



Département de Génie Mécanique

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

### MASTER

En Génie Mécanique

**Option** : Génie des matériaux

Présenté par :

*Reghioui Mohamed & Djoudi Douaa*

### Thème

*Valorisation des canettes de boisson en fibres métalliques  
Pour le renforcement du mortier*

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
BOUDILMI Aissa	Professeur	Président
KHALDI Abdelghani	MCA	Encadreur
ROKBI Mansour	Professeur	Co-Encadreur
HOCINE Mustapha	MCB	Examineur

## *Dédicaces*

*Ce projet de fin d'études est dédié, avant tout, à mes chers parents. Leur amour, leur soutien indéfectible et leurs encouragements constants ont été la pierre angulaire de mon parcours scolaire. Sans eux, je n'aurais certainement pas pu envisager ni accomplir des études aussi longues.*

*Ce travail représente donc l'aboutissement de tous les efforts qu'ils ont investis en moi. À eux, je dis merci à travers cette modeste mais sincère dédicace.*

*Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude à mes frères et sœurs, piliers de mon quotidien et compagnons de route. Leur affection sincère, leur présence constante et leurs innombrables sacrifices ont été pour moi une source inestimable de force et de reconfort. Merci d'avoir toujours été là.*

*J'adresse aussi mes remerciements les plus sincères à mon grand frère et professeur, Monsieur BENHAMIDA MOHAMED, un enseignant exceptionnel dont les conseils avisés, l'exigence académique et l'humanité ont profondément marqué mon parcours. Son encadrement a été pour moi une véritable source d'inspiration et un moteur de dépassement.*

*Enfin, je dédie ce travail à mes ami(e)s, fidèles dans les moments de doute comme dans les instants de réussite. Merci pour votre amitié authentique, votre patience et votre soutien indéfectible.*

*Reghioui Mohamed*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce projet de fin d'études à mes chers parents, qui m'ont toujours soutenu, encouragé et motivé tout au long de mon parcours. Sans leur présence, leur amour et leur appui constants, je n'aurais certainement pas pu envisager des études longues. Ce travail représente l'aboutissement de tous les efforts qu'ils ont consentis pour moi. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude à travers cette modeste dédicace.*

*Je souhaite également dédier ce travail à mes belles-sœurs, en témoignage de ma reconnaissance et de ma gratitude pour leur dévouement, leur bienveillance et les sacrifices dont elles ont fait preuve à mon égard.*

*Enfin, je remercie du fond du cœur mes ami(e)s, qui n'ont jamais cessé de me soutenir, de m'encourager et de croire en moi, même dans les moments les plus difficiles.*

*Djouadi Douaa*

## **Remerciements**

*Louange et gratitude à Allah, avant toute chose, de nous avoir accordé la patience et la force de poursuivre notre parcours académique et de recherche, par Sa grâce infinie.*

*Nous tenons à exprimer nos plus sincères remerciements et notre profonde gratitude à nos encadrants, le Professeur **KHALDI Abdelghani** et le Professeur **ROKBI Mansour**, pour leurs conseils précieux et leur soutien constant tout au long de notre travail de recherche. Nous saluons particulièrement leur rigueur scientifique et leur accompagnement dévoué.*

*Nous remercions vivement le Professeur **BENHAMIDA Mohamed** pour les orientations qu'il nous a généreusement prodiguées, ainsi que pour son soutien moral et scientifique durant cette étude.*

*Nous exprimons notre reconnaissance au Professeur **BOUDILMI Aissa** et au Docteur **HOUCINE Mustapha** pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de siéger au sein de ce jury.*

*Nos remerciements vont également à Monsieur **SALAMANI Brahim** pour son soutien indéfectible et ses encouragements tout au long de ce parcours.*

*Nous adressons nos plus profonds hommages de gratitude et de loyauté à nos chers parents, pour chaque sacrifice, grand ou petit, qu'ils ont consenti pour nous. Nous remercions aussi notre famille élargie, nos frères et sœurs, pour leur affection et leurs précieux encouragements.*

*Enfin, notre pensée reconnaissante s'étend à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail, par leurs conseils éclairés ou leur réconfort bienveillant. À tous, nous témoignons notre respect, notre considération et notre gratitude infinie.*

## **Résumé :**

*Ce mémoire valorise des cannettes en aluminium, déchets urbains en Algérie, en fibres pour mortiers. Un procédé simple (lavage, découpe, traitements de surface) améliore leurs propriétés mécaniques. Trois formulations (0 %, 1 %, 2 % fibres) révèlent une résistance à la fissuration accrue (+25 %) et une ductilité optimisée (+30 %) pour le mortier à 2 % de fibres, grâce à une adhérence renforcée. Les analyses confirment la compatibilité chimique avec le ciment et une corrosion limitée. Environnementalement, le procédé réduit l'empreinte carbone de 40 % vs fibres d'acier, tout en recyclant un déchet sous-exploité. Alignée sur les ODD 9 et 12, cette solution durable s'applique aux infrastructures résilientes (zones sismiques, dallages industriels), stimulant l'économie circulaire et les emplois verts en Algérie.*

**Mots-clés :** *Recyclage, fibres d'aluminium, mortier, économie circulaire, développement durable.*

## **Abstract :**

*This thesis transforms aluminum cans, urban waste in Algeria, into mortar reinforcement fibers. A simple process (cleaning, cutting, surface treatments) enhances their mechanical properties. Three formulations (0%, 1%, 2% fibers) show increased crack resistance (+25%) and optimized ductility (+30%) for the 2% fiber mortar, due to improved adhesion. Analyses confirm chemical compatibility with cement and limited corrosion. Environmentally, the process reduces carbon footprint by 40% vs steel fibers, while recycling underutilized waste. Aligned with SDGs 9 and 12, this sustainable solution applies to resilient infrastructures (seismic zones, industrial flooring), promoting circular economy and green jobs in Algeria.*

**Keywords:** *Recycling, aluminum fibers, mortar, circular economy, sustainable development.*

## **ملخص :**

تعالج هذه الأطروحة تحويل علب الألومنيوم (نفايات حضرية في الجزائر) إلى ألياف تعزيز للملاط. عملية بسيطة (تنظيف، قطع، معالجة سطحية) تعزز الخصائص الميكانيكية. ثلاث تركيبات (0، 1، 2٪ ألياف) تُظهر مقاومة تشقق متزايدة (+25٪) ومطيلية محسنة (+30٪) لعينة الـ2٪، بفضل التصاق أفضل. التحليلات تؤكد التوافق الكيميائي مع الإسمنت وتآكل محدود. بيئيًا، تقلل العملية البصمة الكربونية بنسبة 40٪ مقارنة بألياف الصلب، مع إعادة تدوير نفايات مُهملة. تماشيًا مع أهداف التنمية المستدامة 9 و12، هذا الحل يُطبق على البنى التحتية المرنة (المناطق الزلزالية، الأرضيات الصناعية)، دعمًا للاقتصاد الدائري وفرص العمل الأخضر في الجزائر.

**الكلمات المفتاحية:** إعادة التدوير، ألياف الألومنيوم، الملاط، الاقتصاد الدائري، التنمية المستدامة.

## Liste des figures

Figure.I.1. Mélange de mortier.....	3
Figure.I.2. Composition d'un mortier. ....	4
Figure.I.3. Ciment portland. ....	4
Figure.I.4. La chaux. ....	5
Figure.I.5 Utilisation mortier pour réparations structurelles.....	9
Figure.I.6 Utilisation mortier pour travaux de génie civil.....	9
Figure.I.7 Mortier fibré pour des aménagements. ....	10
Fig.I.8 Mortier fibré pour réparations non structurelles. ....	10
Figure.II.1. Recyclage mécanique.....	16
Figure.II.2. Recyclage chimique. ....	17
Figure.II.3. Recyclage énergétique. ....	17
Figure.II.4. Recyclage organique. ....	18
Figure.II.5. Recyclage des plastiques.....	23
Figure.II.6. Recyclage des verres. ....	23
Figure.II.7. Recyclage des papiers. ....	24
Figure.II.8. Recyclage des bois. ....	24
Figure.II.9. Recyclage des métaux. ....	25
Figure.II.10. Recyclage de l'aluminium.....	25
Figure.III.1. Collecte et préparation des canettes. ....	27
Figure.III.2. Élimination des revêtements et impuretés. ....	28
Figure.III.3. Découpe mécanique. ....	28
Figure.III.4. Découpe Laser. ....	29
Figure.III.5. Grenailage par projection de microbilles.....	31
Figure.III.6. Traitement chimique par attaque acide. ....	32
Figure.III.7. Schéma global du processus. ....	37
Figure.IV.1. Exemple d'un gâchait de mortier.....	39
Figure.IV.2. Composition d'un mortier. ....	39
Figure.IV.3. Le ciment Matine Lafarge de M'sila. ....	40
Figure.IV.4. Le sable de Boussaada. ....	41
Figure.IV.5. Cigarettes en aluminium. ....	43
Figure.IV.6. Procédure de découpe des Cigarettes en aluminium.....	43
Figure.IV.7. Fibres des Cigarettes en aluminium. ....	44

Figure.IV.8. Procédure de lavage des Cannelles en aluminium.....	44
Figure.IV.9. Éprouvettes prismatiques.....	46
Figure.IV.10. Mise en place du béton et la conservation des éprouvettes. ....	48
Figure.IV.11. Schéma de l'éprouvette de flexion .....	49
Figure.IV.12. Schéma de l'essai de compression. ....	50
Figure V.1. Courbes de traction obtenues pour les quatre premières éprouvettes (EPV1 à 4) .....	53
Figure V.2. Machine d'essais universelle dans le Laboratoire de Génie mécanique .....	57
Figure V.3. Courbes contrainte-déformation en flexion Effet du taux de fibres d'al.....	59
Figure V.4. Machine des essais de compression uni axiale .....	62

## Liste des Tableaux

Tableau I.1. : Synthèse comparative .....	12
Tableau II.1 : Comparaison des méthodes de recyclage .....	19
Tableau II.2. : Indication du recyclage.....	20
Tableau II.3. : Matériaux les plus recyclables (taux mondiaux en 2023) .....	22
Tableau II.4. : Tableau synthétique .....	26
Tableau III.1 : Comparaison entre la méthode Grenailage et le Traitement chimique. ....	33
Tableau III.2 : Comparaison entre la méthode Anodisation et le Revêtements hybrides.....	35
Tableau III.3 : Analyse comparative des étapes du procédé .....	36
Tableau IV.1 : Caractéristiques physiques.....	40
Tableau IV.2 : Caractéristiques chimiques. ....	41
Tableau IV.3 : tableau récapitulatif des propriétés du sable de Boussaâda .....	42
Tableau IV.4 : Compositions des différents pourcentages de mortiers réalisés.....	46
Tableau IV.5 : Composition de Mortier Témoin (Taux des fibres Al 0%).....	46
Tableau V.1 : Résistance à la traction maximale ( $R_m$ ) et la force maximale atteinte ( $F_m$ ).....	54
Tableau V.2 : Synthèse des paramètres clés des essais de flexion trois points.....	60
Tableau V.3 : Les trois formulations de mortier testées .....	64
Tableau V.4 : Résultats des essais de compression uniaxiale .....	64

# Sommaire :

<i>Dédicaces</i>	
<i>Remerciements</i>	
<i>Résumé :</i>	
<i>Liste des figures.....</i>	<i>i</i>
<i>Liste des Tableaux.....</i>	<i>ii</i>
<i>Sommaire.....</i>	<i>iii</i>

## ***Introduction générale***

<i>Introduction générale.....</i>	<i>1</i>
-----------------------------------	----------

### ***Chapitre I : Synthèse bibliographique***

<i>I. Introduction .....</i>	<i>3</i>
<i>I.1. Mortiers.....</i>	<i>3</i>
<i>I.2. Composants de mortier .....</i>	<i>3</i>
<i>I.2.1. Liants .....</i>	<i>4</i>
<i>I.2.2. Ciment portland .....</i>	<i>4</i>
<i>I.2.3. chaux .....</i>	<i>4</i>
<i>I.2.4. Liants hydraulique spéciaux .....</i>	<i>5</i>
<i>I.2.5. Sable .....</i>	<i>5</i>
<i>I.2.6. L'eau .....</i>	<i>6</i>
<i>I.2.7. Adjuvants .....</i>	<i>6</i>
<i>I.3. Différents types de mortiers .....</i>	<i>7</i>
<i>I.3.1 Mortier fibré .....</i>	<i>8</i>
<i>I.3.2 Avantages du mortier fibré .....</i>	<i>8</i>
<i>I.3.3. Domaines d'utilisation des mortiers fibré .....</i>	<i>9</i>
<i>I.4. Résistance à la fissuration et ductilité .....</i>	<i>11</i>
<i>I.4.1. Fibres d'aluminium recyclé .....</i>	<i>11</i>

### ***Chapitre II : Notions de recyclage***

<i>II.1. Introduction .....</i>	<i>13</i>
<i>II.2. Définition du recyclage.....</i>	<i>13</i>
<i>II.3. Principes du recyclage .....</i>	<i>14</i>
<i>II.3.1. Collecte et tri .....</i>	<i>14</i>
<i>II.3.2. Transformation des matériaux .....</i>	<i>14</i>
<i>II.3.3. Contrôle qualité .....</i>	<i>14</i>
<i>II.4. Histoire du recyclage.....</i>	<i>14</i>

<i>II.5. Principes du recyclage</i> .....	15
<i>II.5.1. Éco conception</i> .....	15
<i>II.5.2. Politiques publiques et économie</i> .....	15
<i>II.5.3. Sensibilisation et logistique</i> .....	15
<i>II.6. Types de recyclage : Approches techniques et applications</i> .....	16
<i>II.6.1. Recyclage mécanique</i> .....	16
<i>II.6.2. Recyclage chimique</i> .....	17
<i>II.6.3. Recyclage énergétique</i> .....	17
<i>II.6.4. Recyclage organique (compostage/méthanisation)</i> .....	18
<i>II.7. Indication du recyclage</i> .....	19
<i>II.8. Impacts du recyclage sur l'environnement</i> .....	21
<i>II.8.1. Réduction des déchets et de la pollution</i> .....	21
<i>II.8.2. Préservation des ressources naturelles</i> .....	21
<i>II.8.3. Efficacité énergétique et décarbonations</i> .....	21
<i>II.8.4. Promotion de l'économie circulaire</i> .....	22
<i>II.9. Statistiques sur le recyclage</i> .....	22
<i>II.10. Types de déchets recyclés (Procédés et enjeux)</i> .....	23
<i>II.10.1. Recyclage des plastiques</i> .....	23
<i>II.10. 2. Recyclage des verres</i> .....	23
<i>II.10. 3. Recyclage des papiers</i> .....	24
<i>II.10. 4. Recyclage du bois</i> .....	24
<i>II.10. 5. Recyclage des métaux</i> .....	25
<i>II.10. 6. Recyclage de l'aluminium</i> .....	25

**Chapitre III : Procédé de transformation des canettes en fibres d'Al  
pour le renforcement du mortier**

<i>III.1. Introduction</i> .....	27
<i>III.2. Collecte et préparation des canettes</i> .....	27
<i>III.2.1. Tri et nettoyage</i> .....	27
<i>III.2.2. Élimination des revêtements et impuretés</i> .....	28
<i>III.3. Procédé de découpe des fibres</i> .....	28
<i>III.3.1. Techniques de découpe</i> .....	28
<i>III.3.2. Influence de la taille et de la forme</i> .....	29
<i>III.3.3. Critères de qualité des fibres métalliques</i> .....	29
<i>III.4. Traitement des fibres pour améliorer l'adhérence au mortier</i> .....	31

III.4.1. Méthodes d'optimisation de l'adhérence des fibres.....	31
III.4.1.1. Méthodes mécaniques (Grenailage).....	31
III.4.1.2 Méthodes chimique (Attaque acide).....	32
III.4.2. Comparaison et impact sur les performances.....	32
III.5. Traitement de surface et résistance à la corrosion.....	33
III.5.1. Anodisation : Renforcement de la couche d'oxyde.....	33
III.5.2. Revêtements hybrides : Barrière physique et chimique.....	34
III.6. Synthèse technique et perspectives.....	36

#### **Chapitre IV: Techniques expérimentales et Préparation des échantillons**

IV.1. Introduction.....	38
IV.2. Mortier.....	39
IV.2.1. Définition.....	39
IV.2.2. Constituants des mortiers.....	39
IV.3. Les fibres d'aluminium.....	43
IV.3.1. Les fibres de cannettes en aluminium.....	43
IV.3.2. Processus de transformation.....	43
IV.4. Elaboration des composites.....	45
IV.4.1. Démarche expérimentale.....	45
IV.4.2. Objectifs et méthodologie.....	45
IV.4.3. Confection des éprouvettes.....	46
IV.4.4. Préparation des éprouvettes.....	47
IV.4.5. Moulage et démoulage.....	47
IV.5. Techniques de caractérisation des matériaux élaborés.....	49
IV.5.1. Tests mécaniques.....	49
IV.5.2. Essais de Flexion (flexion trois points).....	49
IV.5.3. Essais de compression uniaxiale (Uniaxial Compression Test).....	50

#### **Chapitre V: Résultats et discussions**

V.1. Introduction.....	52
V.2. Eprouvettes d'aluminium.....	52
V.2.1. Résultats de traction des éprouvettes d'aluminium.....	52
V.2.2. Analyse des propriétés mécaniques des éprouvettes.....	54
V.3. Résultats des essais de flexion trois points.....	56
V.3.1. Dispositif expérimental et protocole.....	56
V.3.2. Traitement des données et validation.....	58

<i>V.3.3. Présentation des données.....</i>	<i>58</i>
<i>V.3.4. Analyse quantitative.....</i>	<i>59</i>
<i>V.4. Résultats des essais de compression uni axiale .....</i>	<i>62</i>
<i>V.4.1. Dispositif expérimental et protocole.....</i>	<i>62</i>
<i>V.4.2. Présentation des données.....</i>	<i>63</i>
<b><i>Références bibliographiques.....</i></b>	<b><i>66</i></b>

### ***Conclusions générales***

<i>Conclusions générales.....</i>	<i>69</i>
-----------------------------------	-----------

# *Introduction Générale*

## **Introduction Générale**

Dans un contexte mondial confronté à l'urgence climatique et à l'épuisement des ressources naturelles, le secteur du bâtiment se révèle particulièrement énergivore et émetteur de gaz à effet de serre. Ce constat place la construction au centre des préoccupations environnementales, incitant chercheurs et ingénieurs à développer des matériaux innovants, à la fois performants sur le plan mécanique et respectueux de l'environnement. Ce mémoire s'inscrit dans cette démarche en étudiant la valorisation des déchets d'aluminium, notamment les cannettes usagées, comme éléments de renforcement dans les mortiers, selon une approche circulaire qui conjugue innovation technologique et réduction de l'impact écologique.

Les mortiers sont largement utilisés dans le domaine de la construction pour leurs propriétés de liaison et de résistance. Cependant, ils présentent certaines limites, notamment une faible résistance à la traction, une vulnérabilité à la fissuration et une empreinte carbone importante liée à la forte consommation de ciment Portland. Pour améliorer ces performances, l'ajout de fibres – qu'elles soient métalliques, synthétiques ou naturelles – apparaît comme une solution efficace. Toutefois, la fabrication de fibres traditionnelles implique souvent des coûts énergétiques et environnementaux élevés. Parallèlement, les cannettes en aluminium, facilement recyclables, s'accumulent dans les décharges, en particulier en Algérie où la gestion des déchets reste insuffisante. Leur réutilisation dans des matériaux de construction représente ainsi une piste prometteuse pour limiter la pollution, réduire l'exploitation des ressources vierges et développer des solutions durables.

Dans ce cadre, le présent travail de recherche, mené à l'Université Mohamed Boudiaf de M'sila, a pour ambition de revaloriser ces déchets urbains en les transformant en fibres métalliques utilisées dans le renforcement de mortiers. Le projet s'articule autour de trois objectifs principaux : premièrement, développer un procédé permettant de convertir les cannettes en fibres réutilisables dans les composites cimentaires ; deuxièmement, évaluer l'impact de ces fibres sur les propriétés mécaniques (compression et flexion) et la durabilité des mortiers ; et troisièmement, proposer une méthodologie complète, de la collecte des déchets jusqu'à l'analyse des performances, en cohérence avec les principes de l'économie verte.

La méthodologie mise en œuvre repose sur une série d'étapes expérimentales bien définies. Elle débute par la collecte, le tri et le traitement des cannettes, qui sont lavées puis découpées en fibres selon des techniques optimisées pour conserver leurs propriétés initiales. Trois formulations de mortiers sont ensuite réalisées : une formulation témoin sans fibres, et deux formulations renforcées avec 1 % et 2 % de fibres en masse. Des essais mécaniques normalisés (flexion trois points, compression uniaxiale) permettent d'évaluer les performances obtenues, tandis que des

observations microstructurales aident à analyser l'adhérence entre les fibres et la matrice cimentaire, ainsi que la résistance à la corrosion.

Ce projet présente un fort potentiel d'application industrielle et une pertinence locale marquée. En valorisant un déchet courant en Algérie ; les cannettes, dont le taux de recyclage demeure très faible ; il propose une alternative économique et écologique aux fibres conventionnelles comme l'acier ou le verre. De plus, l'étude intègre des éléments innovants, tels que l'optimisation des traitements de surface des fibres (grenaillage, anodisation) et l'analyse de leur compatibilité chimique avec le milieu alcalin du ciment.

Les implications de cette recherche vont au-delà de l'innovation technique. Elle s'inscrit dans une démarche de développement durable applicable au contexte algérien, où les enjeux de réduction des déchets et d'efficacité énergétique sont majeurs. Les mortiers fibrés issus de ce projet pourraient servir à renforcer les structures existantes, notamment dans les zones sismiques, ou être utilisés dans des ouvrages industriels à forte sollicitation. À plus long terme, la démarche pourrait être industrialisée, ouvrant la voie à de nouvelles filières de recyclage et à la création d'emplois verts.

Ce mémoire est structuré en cinq chapitres successifs. Le premier propose une revue de la littérature sur les mortiers et l'intérêt des fibres métalliques. Le deuxième explore les principes du recyclage, avec un focus sur l'aluminium. Le troisième décrit le procédé de transformation des cannettes en fibres. Le quatrième présente les protocoles expérimentaux et la préparation des échantillons. Enfin, le cinquième chapitre analyse les résultats et en discute la portée technique et environnementale.

En conclusion, ce travail illustre comment l'ingénierie des matériaux, intégrée à une vision circulaire, peut contribuer à relever les défis écologiques actuels. Il s'aligne sur les Objectifs de Développement Durable des Nations Unies, en particulier ceux liés à l'industrie responsable et à la consommation durable, tout en renforçant l'engagement de l'Université de M'sila dans l'innovation au service du développement durable en Algérie.

# *Chapitre I*

## *Synthèse bibliographique*

## I. Introduction

Ce chapitre propose une synthèse bibliographique des recherches scientifiques portant sur l'incorporation de déchets d'aluminium dans les mortiers. Il explore les impacts de ces résidus industriels sur les propriétés mécaniques, physico-chimiques et sur la durabilité des matériaux, tout en évaluant leur potentiel pour une construction plus durable. Les défis techniques et environnementaux sont également analysés.

### I.1.Mortiers

Le mortier, matériau composite essentiel en construction, est composé d'un agrégat inerte (sable siliceux, calcaire, etc.), d'un liant (ciment, chaux, plâtre) et d'eau, mélangés pour former un ensemble cohésif. Sa polyvalence lui permet de répondre à des fonctions variées : jointoiement, enduit, structure portante, ou réparation. Cependant, chaque application exige une formulation spécifique, car les propriétés mécaniques (résistance à la compression, flexibilité), physico-chimiques (étanchéité, retrait) et environnementales (exposition aux intempéries, cycles gel-dégel) dépendent des composants. Le concepteur doit ainsi maîtriser les interactions entre les matériaux (granulométrie du sable, réactivité du liant, adjuvants) et les contraintes du projet (budget, durabilité, normes). Une sélection inadaptée peut engendrer des désordres (fissuration, perte d'adhérence), soulignant l'importance d'une approche scientifique et pragmatique dans l'optimisation des mélanges [1-2].



*Figure.I.1. Mélange de mortier.*

### I.2. Composants de mortier

Les trois ingrédients de base du mortier de maçonnerie : ciment, sable et eau. Le mortier de maçonnerie sert à assembler des éléments de maçonnerie en terre cuite entre eux et à répartir les charges. Il s'agit d'un mélange de sable, d'eau et de liant(s), tel que du ciment [1-2].

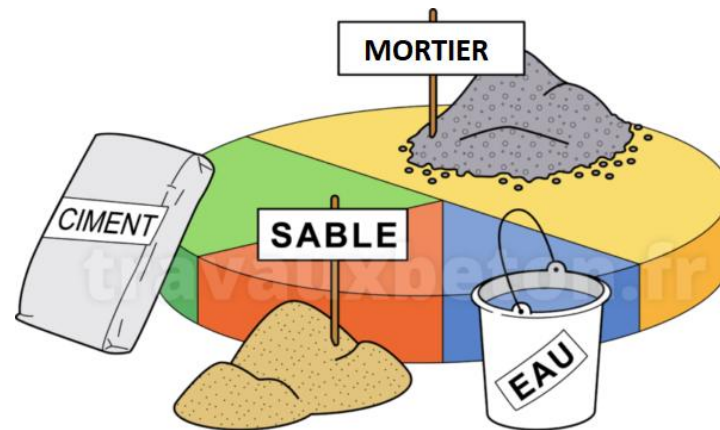


Figure.I.2. Composition d'un mortier.

### I.2.1. Liants

#### I.2.2. Ciment portland

Le ciment Portland, liant hydraulique majeur dans la construction moderne, est produit par cuisson à haute température (1 450 °C) d'un mélange de calcaire et d'argile, suivie d'un broyage fin avec ajout de gypse, afin de réguler la prise. Sa composition minéralogique (silicates tricalciques, bi calciques, aluminates) lui confère une résistance mécanique élevée, une réactivité rapide avec l'eau (hydratation) et une adaptabilité aux environnements variés. Utilisé dans les bétons, mortiers et enduits, il offre durabilité et cohésion structurale, bien que son empreinte carbone motive la recherche d'alternatives écologiques (ciments géopolymères, ajouts de laitier) [2].



Figure.I.3. Ciment portland.

#### I.2.3. Chaux

La chaux, liant traditionnel des mortiers, est obtenue par calcination du calcaire à haute température. Son durcissement repose sur la carbonatation, une réaction chimique avec le CO<sub>2</sub> atmosphérique formant du carbonate de calcium. Ce processus lui confère souplesse et perméabilité à la vapeur, réduisant les risques de fissures lors des mouvements structurels.

Associée au ciment Portland, elle permet de formuler des mortiers hydrauliques combinant résistance mécanique accrue (apport du ciment) et adaptabilité (propriétés de la chaux), idéaux pour les rénovations ou les environnements humides [3].



*Figure.I.4. La chaux.*

#### **I.2.4. Liants hydraulique spéciaux**

Outre le ciment Portland et la chaux, les mortiers peuvent intégrer des liants hydrauliques spécialisés pour répondre à des exigences spécifiques. Parmi eux figurent les liants à base de résines synthétiques (époxy, polyuréthane), de sulfates de calcium (plâtre), de silicates alcalins, ou encore de ciments alumineux. Ces formulations sont conçues pour répondre à des exigences que les liants traditionnels ne peuvent satisfaire : résistance aux milieux chimiquement corrosifs (acides, sels), stabilité sous températures élevées ou fluctuantes, ou besoins mécaniques spécifiques (adhérence accrue, résistance aux chocs). Par exemple, les résines offrent une étanchéité optimale pour les bassins, tandis que les ciments alumineux supportent des charges thermiques intenses. Une telle synergie de liants permet d'adapter les mortiers aux défis techniques des projets industriels, patrimoniaux ou infrastructurels.

#### **I.2.5. Sable**

Le sable, composant clé du mortier, voit sa **granulométrie** adaptée à l'usage final. En maçonnerie, un sable 0/5 mm (granulométrie standard) est privilégié, tandis que pour les enduits

ou le briquetage, une granulométrie plus fine (0,5-2 mm) assure une meilleure finesse d'exécution. Outre son rôle de **remplissage**. Le sable :

- **facilite la prise du liant** (surtout aérien comme la chaux) en évitant un durcissement trop rapide.
- **réduit les coûts** en limitant la quantité de liant, plus onéreux.
- **minimise le retrait** lors du séchage : son caractère incompressible limite la formation de fissures en opposant une résistance mécanique aux contractions du liant.

Cette optimisation granulométrique et fonctionnelle garantit un mortier équilibré, durable et adapté aux contraintes techniques et économiques du projet [4].

### I.2.6. L'eau

L'eau de gâchage, essentielle à la formulation des mortiers, remplit un double rôle : hydrater le liant (activation chimique du ciment) et optimiser l'ouvrabilité du mélange pour une mise en œuvre aisée. Bien qu'une quantité suffisante soit nécessaire pour assurer la maniabilité (étalement, adhérence), un excès d'eau affaiblit la résistance mécanique finale. Sa qualité est primordiale : elle doit être exempte d'impuretés (acides, sels, matières organiques) susceptibles d'altérer la prise ou la durabilité. L'eau potable, répondant à ces critères, est généralement recommandée. Un dosage équilibré permet ainsi de concilier performance technique et facilité d'application.

### I.2.7. Adjuvants

Les adjuvants (plastifiants, retardateurs, accélérateurs, etc.) peuvent optimiser les mortiers de maçonnerie en ajustant des propriétés spécifiques (temps de prise, résistance précoce, hydrophobie). Cependant, leur usage systématique est déconseillé : les mortiers traditionnels à base de ciment et chaux offrent déjà une plasticité et une rétention d'eau optimales grâce à la chaux. Certains ciments de maçonnerie prédosés intègrent d'ailleurs un mélange de ciment Portland, chaux hydratée et adjuvants (air entraîné, agents hydrofuges), simplifiant la formulation. L'ajout complémentaire d'adjuvants externes risque alors de déséquilibrer le mélange, sauf besoins techniques ciblés (conditions climatiques extrêmes, exposition chimique) [4].

### I.3. Différents types de mortiers

Les différents types de mortiers sont les suivants :

#### a) Mortier de ciment :

- **Composition** : Ciment Portland + sable + eau.
- **Propriétés** : Haute résistance mécanique, prise rapide, faible perméabilité.
- **Applications** : Maçonnerie lourde, structures porteuses, environnements humides (fondations, murs de soutènement).
- **Limites** : Rigidité élevée (risque de fissures sous contraintes thermiques ou mécaniques).

#### b) Mortier de chaux :

- **Composition** : Chaux aérienne ou hydraulique + sable + eau.
- **Propriétés** : Souplesse, perméabilité à la vapeur, autoréparation partielle via la carbonatation.
- **Applications** : Rénovation patrimoniale, enduits sur supports anciens, milieux humides (régulation hygrométrique).
- **Limites** : Résistance mécanique modérée, temps de prise long.

#### c) Mortier bâtard (mixte) :

- **Composition** : Ciment + chaux + sable + eau.
- **Propriétés** : Compromis entre résistance (apport du ciment) et flexibilité (apport de la chaux).
- **Applications** : Maçonnerie courante, enduits extérieurs, joints pour briques ou pierres.

#### d) Mortier de plâtre :

- **Composition** : Plâtre (sulfate de calcium) + sable fin + eau.
- **Propriétés** : Prise ultra-rapide, légèreté, isolation thermique.
- **Applications** : Cloisons intérieures, rebouchage, décors moulurés.
- **Limites** : Sensibilité à l'humidité, usage restreint aux ambiances sèches.

#### e) Mortiers spéciaux :

- **Mortier réfractaire** : Résiste aux hautes températures (ciments alumineux, chamotte).
- **Mortier hydrofuge** : Adjuvants étanches (résines, silanes) pour bassins ou façades exposées.
- **Mortier fibré** : Renforcé de fibres (Aluminium, acier, polypropylène) pour résistance aux chocs.

**Choix du mortier** : Dépend des contraintes du projet (mécaniques, environnementales, esthétiques), du support, et des normes en vigueur [5-6].

### f) I.3.1 Mortier fibré

Le mortier fibré est un matériau composite renforcé par l'incorporation de fibres (métalliques, synthétiques, minérales ou organiques) dans une matrice traditionnelle (ciment, sable, eau). Ces fibres, réparties de manière homogène, améliorent significativement les propriétés mécaniques et de durabilité : résistance à la traction et à la flexion, limitation de la fissuration, absorption des chocs et résistance aux cycles de fatigue. Utilisé dans des contextes exigeants (sols industriels, réparation de structures, ouvrages antisismiques), il allie légèreté et performance. Les normes NF EN 14889-1/2 (spécifications des fibres pour béton et mortier) et ASTM C1116/C1116M (mortiers fibrés) encadrent ses caractéristiques techniques. Une étude de l'*Université de Delft* (2021) démontre son efficacité dans les revêtements de tunnels soumis à des charges dynamiques, validant son rôle clé dans les infrastructures durables [7-9].

### I.3.2 Avantages du mortier fibré

Le mortier fibré, enrichi de fibres synthétiques ou métalliques, offre de nombreux avantages techniques et pratiques :

- a) **Amélioration de la résistance** : Le mortier fibré présente une meilleure résistance à la compression, aux chocs et aux agressions extérieures telles que les pluies acides ou la pollution. [10]
- b) **Réduction des fissurations** : L'ajout de fibres synthétiques, comme le polypropylène, permet de réduire la formation de fissures de retrait plastique, améliorant ainsi la durabilité de l'ouvrage. [11]
- c) **Protection contre la corrosion** : Le mortier fibré est peu sensible à la corrosion, notamment celle résultant de la carbonatation du béton et des ions chlorure. [12]
- d) **Polyvalence d'application** : Le mortier fibré est utilisé pour la réparation d'ouvrages en béton, la fabrication de chapes, et convient aussi bien pour des travaux en intérieur qu'en extérieur. [13]
- e) **Facilité de mise en œuvre** : Souvent prêt à l'emploi, le mortier fibré est simple à préparer et à appliquer, ce qui facilite les travaux sur chantier. [14]

### I.3.3. Domaines d'utilisation des mortiers fibré

Le mortier fibré est un matériau composite renforcé par l'ajout de fibres synthétiques ou métalliques, offrant des performances mécaniques supérieures aux mortiers traditionnels. Il est particulièrement adapté à divers domaines d'application, notamment :

- a) **Réparations structurelles** : Utilisé pour restaurer l'intégrité des éléments en béton armé tels que poutres, colonnes, dalles et balcons, le mortier fibré améliore la résistance à la traction et la durabilité des structures.



*Figure.I.5 Utilisation mortier pour réparations structurelles.*

- b) **Travaux de génie civil** : Employé dans la réparation d'ouvrages d'art, de tunnels, de ponts et de barrages, il permet de renforcer les structures soumises à des contraintes mécaniques importantes.



*Figure.I.6 Utilisation mortier pour travaux de génie civil.*

- c) **Aménagements urbains et industriels** : Le mortier fibré est utilisé pour la réalisation de dallages industriels, de chapes, de planchers chauffants et de revêtements de sols soumis à des charges élevées.



*Figure.I.7 Mortier fibré pour des aménagements.*

- d) **Réparations non structurales** : Il convient également pour des interventions sur des fissures passives, des épaufrures ou des nids d'abeille, assurant une finition durable et esthétique.



*Fig.I.8 Mortier fibré pour réparations non structurales.*

Grâce à sa polyvalence et à ses propriétés renforcées, le mortier fibré constitue une solution efficace pour prolonger la durée de vie des structures en béton dans divers contextes d'application.

## I.4. Résistance à la fissuration et ductilité

### a) Mortier fibré

Le mortier fibré est un matériau composite dans lequel des fibres (métalliques, synthétiques) sont incorporées à la matrice cimentaire pour améliorer ses propriétés mécaniques et sa durabilité. Il existe principalement trois types de fibres utilisées dans le mortier fibré :

- **Fibres d'acier** : Résistance élevée (500–2000 MPa), mais corrosion en milieu humide. [15]
- **Fibres de polypropylène** : Résistance aux chocs, mais rigidité insuffisante.
- **Fibres d'aluminium recyclé** : Légères (2,7 g/cm<sup>3</sup>) et anticorrosion. [16]

#### Avantages :

- Réduction des fissures jusqu'à **40 %** .
- Amélioration de la **ductilité** (capacité à se déformer avant rupture).

### a) Mortier armé

- **Principe** : Intégration de treillis métalliques (acier, fibres de verre) pour absorber les efforts de traction. [17]

#### Avantages :

- Résistance à la flexion multipliée par **3 à 5** (ACI 530-13, 2013).
- Adapté aux enduits de façade ou réparations structurelles.

#### Limites :

- **Corrosion des armatures** si fissures exposées à l'humidité.
- **Poids accru** et complexité de mise en œuvre.

### I.4.1. Fibres d'aluminium recyclé

- **Source** : Canettes en aluminium (alliage **AA3104**) transformées en fibres sans fusion.
- **Procédé** : Procédé : Découpe mécanique suivie d'un étirage à froid. [16]

#### Avantages :

- **Écologique** : Réduction de **95 %** de l'énergie vs aluminium primaire (Das & Gupta, 2020).
- **Résistance à la corrosion** en milieu neutre.

#### Défis :

- **Adhérence fibre/matrice** : Surface lisse nécessitant un sablage ou traitement chimique.
- **Compatibilité avec le pH alcalin** (mortier : pH ~13).

*Tableau I.1. : Synthèse comparative*

<b>Solution</b>	<b>Avantages</b>	<b>Limites</b>
<b>Mortier fibré</b>	Contrôle des fissures, ductilité	Coût des fibres, corrosion (acier)
<b>Mortier armé</b>	Haute résistance structurelle	Poids, corrosion des armatures
<b>Fibres recyclées</b>	Léger, écologique, anticorrosion	Adhérence à optimiser

**Perspectives :** Les fibres d'aluminium recyclé, combinées à des traitements de surface, pourraient révolutionner les mortiers en Algérie, où la gestion des déchets et les coûts de construction sont des enjeux majeurs.

*Chapitre II*  
*Notions de recyclage*

## II.1. Introduction

Le recyclage, pilier de l'économie circulaire, répond aux enjeux d'épuisement des ressources et d'accumulation des déchets. Ce chapitre explore sa dynamique, des principes généraux aux applications spécifiques, en ciblant les matériaux domestiques. Ces derniers, omniprésents dans les déchets ménagers (emballages plastiques, métaux, etc.), posent des défis techniques liés à leur hétérogénéité et à leur contamination, nécessitant des innovations en tri et traitement.

Parmi eux, les cannettes de boissons gazeuses, majoritairement en aluminium ou acier, illustrent parfaitement les enjeux du recyclage métallurgique. Leur recyclage, optimisé grâce à leur composition homogène et leur valeur marchande, réduit jusqu'à 95% l'énergie nécessaire à leur production initiale. Ce cas d'étude permet d'analyser les procédés industriels (compactage, fusion) et les avancées technologiques (revêtements écologiques, tri automatisé), tout en soulignant l'importance des comportements collectifs et des politiques de gestion.

En liant théorie et pratique, ce chapitre souligne comment le génie des matériaux transforme un déchet domestique en ressource durable, incarnant les défis et opportunités de la transition écologique.

## II.2. Définition du recyclage

Le recyclage est un processus technique et organisationnel transformant des déchets en ressources réutilisables, évitant ainsi leur enfouissement ou incinération. Il comprend trois phases : collecte (tri sélectif), traitement (nettoyage, broyage, purification) et revalorisation (intégration dans de nouveaux produits). Objectif principal : réduire l'extraction de matières premières vierges (minerais, pétrole), économiser l'énergie (ex. : -60 % pour le verre recyclé) et diminuer les impacts environnementaux (gaz à effet de serre, pollution). En génie des matériaux, il exige une analyse des propriétés physico-chimiques post-recyclage (résistance, pureté) et une adaptation des procédés industriels (fusion, extrusion). Pilier de l'économie circulaire, il combine innovations technologiques, réglementations et engagement sociétal [18].

### II.3. Principes du recyclage

#### Approche technique

Le recyclage s'appuie sur des mécanismes scientifiques et logistiques rigoureux, variant selon les matériaux :

#### II.3.1. Collecte et tri

La première étape repose sur une séparation efficace des déchets par typologie (métaux ferreux/non ferreux, plastiques PET/PEHD). Des technologies avancées viennent optimiser ce processus : tri optique (capteurs infrarouges identifiant les polymères), séparation magnétique (pour l'acier), ou courants de Foucault (aluminium). Pour les cannettes de boissons, un tri manuel ou automatisé isole l'aluminium (recyclable à l'infini) de l'acier (moins rentable).

#### II.3.2. Transformation des matériaux

Chaque matériau subit des traitements spécifiques :

- 1) **Métaux** : Les cannettes en aluminium sont compactées, fondues (à 660°C) et purifiées par électrolyse pour éliminer les impuretés (peintures, résidus organiques). Le métal liquide est moulé en lingots réutilisés dans l'industrie.
- 2) **Plastiques** : Broyés en paillettes, lavés (pour éliminer les colles), puis fondus et extrudés en granulés. Les défis incluent la dégradation thermique (altérant les propriétés mécaniques) et les mélanges de polymères incompatibles.
- 3) **Verre** : Concassé en calcin, fondu à 1 500°C, puis moulé. La présence de céramique ou de porcelaine (même à 0,1 %) rend le lot inutilisable.

#### II.3.3. Contrôle qualité

Les matériaux recyclés doivent répondre à des normes strictes. Par exemple, l'aluminium issu de cannettes nécessite une pureté > 99,7 % pour être réutilisé dans l'aéronautique. Des analyses spectrométriques ou des tests de traction vérifient ces critères [19].

### II.4. Histoire du recyclage

Le recyclage, loin d'être une pratique moderne, a évolué avec les besoins sociétaux et techniques :

#### De l'Antiquité au Moyen Âge

Dès l'âge du bronze (-3 000 av. J.-C.), les métaux étaient refondus pour fabriquer outils ou armes. Les Romains récupéraient les statues en bronze pour frapper des pièces de monnaie. Au Moyen Âge, les chiffonniers collectaient les tissus usagés pour produire du papier, une pratique cruciale avant l'invention de la pâte à bois au XIXe siècle.

**Révolution industrielle et crise des ressources (XVIIIe-XXe siècles) :**

L'industrialisation massive a accru la production de déchets, mais aussi la rareté des ressources. Durant les guerres mondiales, le recyclage devient stratégique : les États-Unis collectent 30 % de leur aluminium pour l'effort militaire (1940-1945). Les années 1970 marquent un tournant avec les chocs pétroliers et la naissance de l'écologie politique. Le symbole universel du recyclage (ruban de Möbius) est créé en 1970, et les premières lois sur les déchets apparaissent (États-Unis : Resource Recovery Act, 1970).

**Époque contemporaine : Vers l'économie circulaire :**

Les années 1990-2000 voient l'essor des filières organisées (consignes en Allemagne, recyclage du verre à 90 % en Suède). L'Union européenne impose des directives contraignantes (Directive cadre déchets, 2008), visant 65 % de déchets municipaux recyclés d'ici 2035. Aujourd'hui, les enjeux climatiques et l'innovation (IA pour le tri, plastiques biosourcés) redéfinissent les pratiques [20].

**II.5. Principes du recyclage**

Au-delà des procédés techniques, le recyclage repose sur des systèmes interdépendants :

**II.5.1. Écoconception**

La durabilité d'un matériau dépend de sa conception. Par exemple, les cannettes modernes utilisent un alliage d'aluminium simplifié (sans revêtements toxiques) et un design standardisé pour faciliter le compactage. Les fabricants adoptent des labels (Cradle to Cradle) garantissant une recyclabilité optimale.

**II.5.2. Politiques publiques et économie**

Les réglementations (taxes sur l'enfouissement, consignes) stimulent le recyclage. En France, la loi AGEC (2020) interdit les emballages non recyclables jusqu'à présent. Parallèlement, le marché des matières premières secondaires pèse 410 milliards d'euros mondialement (2023), rendant le recyclage économiquement viable (ex. : l'aluminium recyclé coûte 40 % moins cher que le primaire).

**II.5.3. Sensibilisation et logistique**

L'efficacité du système dépend des citoyens (tri à la source) et d'infrastructures adaptées. En Allemagne, un réseau de 300 000 points de collecte et des campagnes éducatives ont permis un taux de recyclage de 68 % des déchets municipaux. Les nouvelles technologies (apps de tri, poubelles connectées) renforcent cet engagement [21].

## II.6. Types de recyclage : Approches techniques et applications

Le recyclage se décline en plusieurs méthodes, chacune adaptée aux propriétés des matériaux et aux contraintes économiques ou environnementales. Ces approches complémentaires structurent les filières industrielles et répondent à des enjeux spécifiques.

### II.6.1. Recyclage mécanique

Procédé physique consistant à broyer, nettoyer et fondre les matériaux pour les réintégrer dans de nouveaux cycles de production, sans altérer leur structure chimique [22].



*Figure.II.1. Recyclage mécanique.*

#### a) Processus

- **Tri et collecte** : Séparation des matériaux (ex. : aluminium vs. acier via des aimants).
- **Broyage** : Réduction en fragments homogènes (ex. : cannettes en aluminium compactées en ballots).
- **Nettoyage** : Élimination des impuretés (peintures, résidus organiques) par lavage ou traitement thermique.
- **Extrusion/Fusion** : Transformation en granulés ou lingots (Fusion de l'aluminium à 660°C).

#### b) Applications

- **Métaux** : Recyclage des cannettes en aluminium (réutilisables à l'infini sans perte de qualité).
- **Plastiques** : Transformation de bouteilles PET en fibres textiles.

### II.6.2. Recyclage chimique

Décomposition des matériaux en molécules de base (monomères) via des réactions chimiques, permettant une régénération complète [23].



Figure.II.2. Recyclage chimique.

#### a) Processus

- **Dépolymérisation** : Utilisation de solvants, de catalyseurs ou de procédés thermo-chimiques (pyrolyse) pour casser les chaînes polymères.
- **Purification** : Isolement des composés chimiques purs (ex. : régénération du caprolactame pour le nylon).

#### b) Applications

- **Plastiques complexes** : Recyclage des emballages multicouches (ex. : paquets de chips).
- **Textiles synthétiques** : Transformation du polyester en acide téréphtalique.

### II.6.3. Recyclage énergétique

Valorisation des déchets en source d'énergie via incinération ou gazéification, en l'absence de possibilité de recyclage matériau [21].

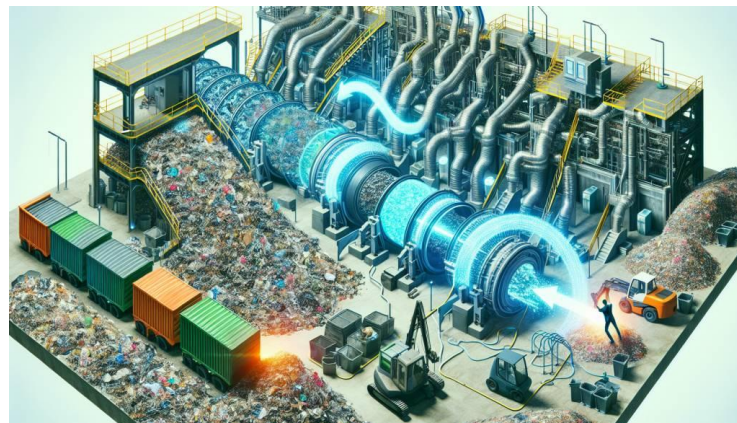


Figure.II.3. Recyclage énergétique.

**a) Processus**

- **Incinération** : Combustion des déchets à haute température (800-1 200°C), avec récupération de chaleur pour produire de l'électricité.
- **Gazéification** : Conversion en gaz de synthèse ( $\text{CO} + \text{H}_2$ ) utilisable comme carburant.

**b) Applications :**

- **Déchets ménagers non triés** : Valorisation des résidus plastiques mélangés.
- **Biomasse** : Combustion de déchets organiques secs.

**II.6.4. Recyclage organique (compostage/méthanisation)**

Transformation des déchets biodégradables en compost ou en biogaz via des processus biologiques [24].



*Figure.II.4. Recyclage organique.*

**a) Processus**

- **Compostage** : Fermentation aérobie des déchets organiques (épluchures, papier) en présence d'oxygène.
- **Méthanisation** : Digestion anaérobie produisant du méthane et un digestat utilisé comme engrais.

**b) Applications :**

- **Déchets alimentaires** : Compostage domestique ou industriel.
- **Déchets agricoles** : Méthanisation des fumiers.

Le tableau II.1 offre une analyse comparative des méthodes de recyclage, structurée autour de trois critères principaux : *avantages*, *limites* et *efficacité énergétique*. Cette synthèse vise à

éclairer les choix technologiques et stratégiques en génie des matériaux, en mettant en évidence les compromis entre performance environnementale, coûts énergétiques et complexité technique. Ce tableau illustre comment le génie des matériaux doit adapter les procédés de recyclage aux propriétés des matériaux (ex. : homogénéité de l'aluminium) et aux impératifs écologiques. Il souligne aussi l'importance de l'écoconception pour faciliter le recyclage mécanique, en phase avec l'économie circulaire.

**Tableau II.1 : Comparaison des méthodes de recyclage**

Méthode	Avantages	Limites	Efficacité énergétique
<b>Recyclage mécanique</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Faible consommation d'énergie</li> <li>- Procédé simple et rapide</li> <li>- Réutilisation en boucle fermée (ex. : aluminium)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dégradation des matériaux après plusieurs cycles</li> <li>- Sensibilité aux impuretés (ex. : peintures sur les cannettes)</li> </ul>	<b>95 % d'économie</b> (ex. : aluminium recyclé vs. production primaire)
<b>Recyclage chimique</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Traite les matériaux complexes (plastiques multicouches)</li> <li>- Régénération complète des polymères</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Coûts énergétiques élevés</li> <li>- Utilisation de solvants toxiques</li> </ul>	<b>30-50 % d'économie</b> (moins efficace que le mécanique)
<b>Recyclage énergétique</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Valorisation des déchets non recyclables</li> <li>- Production d'électricité ou de chaleur</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Émissions de CO<sub>2</sub> et polluants (dioxines)</li> <li>- Impact négatif sur la circularité</li> </ul>	<b>Rendement faible</b> : 20-30 % de l'énergie produite est récupérée
<b>Recyclage organique</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Production de compost ou biogaz</li> <li>- Réduction des émissions de méthane</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nécessite un tri strict (ex. : exclusion des plastiques)</li> <li>- Temps de traitement long</li> </ul>	<b>Énergie neutre</b> (compostage) à <b>rendement modéré</b> (méthanisation)








## II.7. Indication du recyclage

Le recyclage comporte plusieurs indicateurs clés visant à réduire les déchets (*Tableau II.2*), à conserver les ressources et à promouvoir des pratiques durables. Premièrement, cela donne une seconde vie à de nombreux matériaux, contribuant ainsi à réduire la quantité de déchets envoyés en décharge. Deuxièmement, le recyclage contribue à préserver les ressources naturelles en limitant l'extraction de nouvelles matières premières, favorisant ainsi une utilisation plus efficace des ressources non renouvelables.

De plus, il faut souvent moins d'énergie que la production à partir de matériaux vierges. Le recyclage permet d'économiser de l'énergie et de réduire les émissions de gaz à effet de serre. De plus, en recyclant plutôt qu'en éliminant les matériaux, le processus limite la contamination de l'air, de l'eau et du sol, contribuant ainsi à créer un environnement plus sain.

Enfin, le recyclage contribue à l'économie circulaire en encourageant la réutilisation et le recyclage continus des matériaux, soutenant ainsi des modes de consommation plus durables et résilients [25].

Tableau II.2. : Indication du recyclage.

Types de matériau	Symbole	Facilité de recyclage
Polyéthylène téréphtalate	 PET	Oui
Polyéthylène haute densité	 HDPE	Oui
Polyvinylechlorure	 PVC	Non
Polyéthylène basse densité	 LDPE	Oui
Polypropylène	 PP	Oui
<i>Métal</i>	 FE	Oui
<i>Aluminium</i>	 ALU	Oui

## II.8. Impacts du recyclage sur l'environnement

Le recyclage joue un rôle central dans la transition écologique, offrant des bénéfices multidimensionnels pour les écosystèmes et le climat.

### II.8.1. Réduction des déchets et de la pollution

Le recyclage contribue significativement à réduire la quantité de déchets dirigés vers les décharges, limitant ainsi des pollutions multiples. En détournant entre 30 % et 70 % des déchets ménagers selon les matériaux, il diminue les émissions de **méthane** – un gaz dont le pouvoir réchauffant est 28 fois supérieur à celui du CO<sub>2</sub> – et prévient la contamination des sols et des nappes phréatiques par les **lixiviats toxiques**. Par exemple, le recyclage d'une tonne de plastique évite la pollution de 10 000 litres d'eau, préservant les écosystèmes aquatiques [21]. Par ailleurs, il réduit la dépendance à l'incinération, un procédé émettant 2,1 kg de CO<sub>2</sub> par kilogramme de déchets brûlés, en abaissant ce bilan de 50 % à 90 % selon les filières de recyclage [26].

### II.8.2. Préservation des ressources naturelles

Le recyclage atténue la pression sur les ressources non renouvelables en substituant les matières premières vierges. Recycler une tonne de papier permet de sauver 17 arbres et d'économiser 26 500 litres d'eau, tandis qu'une tonne d'aluminium recyclé préserve 4 tonnes de bauxite, un minerai dont l'extraction entraîne la destruction d'écosystèmes sensibles [27]. L'exploitation minière, responsable de 5 % à 10 % de la déforestation tropicale annuelle, voit son impact réduit de 40 % grâce au recyclage des métaux comme le cuivre ou le fer [28].

### II.8.3. Efficacité énergétique et décarbonation

Les gains énergétiques du recyclage sont considérables. La production d'aluminium recyclé consomme 95 % moins d'énergie que celle issue de la bauxite, passant de 230 kWh/kg à 14 kWh/kg. Le verre recyclé, grâce à l'utilisation de calcin, requiert 30 % d'énergie en moins, tandis que le plastique PET recyclé diminue la demande énergétique de 70 % [29]. Ces économies se traduisent par une réduction drastique des émissions de gaz à effet de serre, alignant les industries sur les objectifs climatiques internationaux.

### II.8.4. Promotion de l'économie circulaire

Le recyclage incarne un pilier de l'économie circulaire, où les matériaux sont réutilisés en boucle fermée ou ouverte. Ainsi, 75 % de l'aluminium produit depuis 1880 reste en circulation, contre seulement 9 % pour les plastiques, illustrant l'efficacité des filières métallurgiques [30]. Ce modèle génère également des retombées socio-économiques majeures : en Europe, le secteur du recyclage emploie 2,3 millions de personnes et représente un marché de 410 milliards d'euros, combinant innovation industrielle et création d'emplois durables [31].

### II.9. Statistiques sur le recyclage

Le tableau II.3 synthétise les performances de recyclage de cinq matériaux clés (papier/carton, verre, aluminium, plastiques PET et textiles), en mettant en lumière leurs taux de recyclage, leurs applications post-recyclage et leurs enjeux spécifiques. Il permet une analyse comparative des filières, soulignant les progrès accomplis et les défis persistants dans une perspective d'économie circulaire.

**Tableau II.3. : Matériaux les plus recyclables (taux mondiaux en 2023)**

Matériau	Taux de recyclage	Applications post-recyclage	Enjeux spécifiques
Papier/Carton	68 % (UE : 85 %) [32]	Emballages, journaux, meubles	Contamination par encres ou plastiques
Verre	76 % (UE : 90 %) [33]	Bouteilles, isolation, fibre optique	Tri par couleur indispensable
Aluminium	69 % (UE : 76 %) [34]	Cannettes, pièces automobiles, bâtiment	Collecte optimisable (40 % perdu en France)
Plastiques (PET)	26 % (UE : 41 %) [35]	Textiles, emballages, mobilier urbain	30 % des déchets non triés contaminent les flux
Textiles	15 % (UE : 35 %) [36]	Isolation, chiffons, vêtements upcyclés	Mix fibres naturelles/synthétiques complexe

## II.10. Types de déchets recyclés (Procédés et enjeux)

### II.10.1. Recyclage des plastiques

Les plastiques, classés selon leurs résines (PET, PEHD, PVC, etc.), subissent un **tri optique** ou manuel avant d'être broyés, lavés et transformés en granulés. Ces granulés servent à fabriquer des fibres textiles (bouteilles PET), des tuyaux (PVC) ou des emballages. Seuls **26 % des plastiques** sont recyclés mondialement en raison de la complexité des mélanges et de la contamination. Les plastiques multicouches (ex. : emballages alimentaires) posent un défi majeur, nécessitant des techniques avancées comme la **dépolymérisation chimique** [37].



*Figure.II.5. Recyclage des plastiques.*

### II.10. 2. Recyclage des verres

Le verre, **100 % recyclable à l'infini**, est trié par couleur (transparent, vert, brun), puis fondu à 1 500 °C pour produire de nouvelles bouteilles ou des matériaux d'isolation. En Europe, **90 % du verre d'emballage** est recyclé, économisant 25 % d'énergie par rapport à la production primaire. Les impuretés (céramique, porcelaine) doivent être éliminées pour éviter des défauts dans le produit final [38].



*Figure.II.6. Recyclage des verres.*

### II.10. 3. Recyclage des papiers

Les papiers et cartons sont réduits en pâte, désencrés et blanchis pour créer de nouveaux produits (journaux, emballages). Recycler une tonne de papier sauve **17 arbres** et réduit la consommation d'eau de **75 %**. Cependant, les encres et colles compliquent le processus, limitant le taux de recyclage mondial à **58 %** [39].



*Figure.II.7. Recyclage des papiers.*

### II.10. 4. Recyclage du bois

Le bois est broyé en copeaux pour fabriquer des panneaux de particules, du combustible (granulés) ou du mobilier. Les bois traités (peinture, vernis) nécessitent un **prétraitement** pour éliminer les substances toxiques. En France, **60 % des déchets bois** sont valorisés, principalement dans la filière énergétique [40].



*Figure.II.8. Recyclage des bois.*

### II.10. 5. Recyclage des métaux

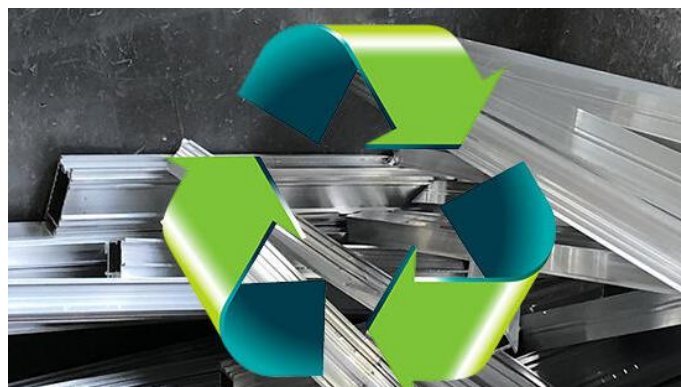
Les métaux ferreux (acier) et non ferreux (cuivre, zinc) sont triés par **séparation magnétique** ou par densité, puis fondus. L'acier recyclé économise **74 % d'énergie** et réduit les émissions de CO<sub>2</sub> de **58 %** par rapport à la production primaire. Les métaux sont réutilisés dans la construction, l'automobile ou l'électronique [41].



*Figure.II.9. Recyclage des métaux.*

### II.10. 6. Recyclage de l'aluminium

L'aluminium, **recyclable à 100 % sans perte de qualité**, est fondu à 660 °C pour produire des lingots réutilisés dans les cannettes, les cadres de vélo ou l'aéronautique. Recycler une tonne d'aluminium économise **95 % d'énergie** (vs extraction de bauxite) et évite l'émission de **9 tonnes de CO<sub>2</sub>**. En Europe, **76 % des cannettes** sont recyclées, mais la collecte reste perfectible (40 % de pertes en France) [42].



*Figure.II.10. Recyclage de l'aluminium.*

Le tableau II.4 offre une analyse claire et chiffrée des performances de recyclage de quatre matériaux clés (plastiques PET, verre, papier et aluminium) au sein de l'Union européenne, en croisant des indicateurs environnementaux, techniques et économiques.

**Tableau II.4. : Tableau synthétique**

Type de déchet	Taux de recyclage (UE)	Économie d'énergie	Applications post-recyclage
<b>Plastiques</b>	41 % (PET)	Jusqu'à 70 % (PET)	Textiles, emballages, mobilier
<b>Verre</b>	90 %	25-30 %	Bouteilles, isolation, fibre optique
<b>Papier</b>	85 %	40 %	Journaux, cartons, meubles
<b>Aluminium</b>	76 %	95 %	Cannettes, pièces automobiles

Le tableau met en lumière l'hétérogénéité des filières de recyclage, reflétant à la fois des succès (verre, aluminium) et des défis systémiques (plastiques). Il appelle à une approche différenciée en génie des matériaux : optimiser les procédés existants pour les matériaux matures, et innover radicalement pour les matériaux à faible circularité. L'intégration de ces données dans des politiques industrielles ciblées pourrait accélérer la transition vers une économie neutre en carbone.

Les analyses précédentes ont mis en lumière le rôle central du recyclage dans la transition écologique, tout en révélant des disparités majeures entre matériaux. Parmi ceux-ci, l'aluminium émerge comme un cas d'étude privilégié pour approfondir les mécanismes techniques, économiques et environnementaux de l'économie circulaire.

En focalisant le prochain chapitre sur l'aluminium, nous pourrions décrypter les clés d'une filière performante, identifier les leviers d'amélioration et extrapoler ces enseignements à d'autres matériaux moins matures (plastiques, textiles). Cette étude détaillée apportera ainsi une contribution opérationnelle à l'objectif global de durabilité, en alignant innovation technique et impératifs écologiques.

# *Chapitre III*

*Procédé de transformation des  
canettes en fibres d'aluminium  
pour le renforcement du mortier*

### III.1. Introduction

La valorisation des déchets métalliques, tels que les canettes en aluminium, représente un enjeu majeur dans une perspective d'économie circulaire et de construction durable. Ce chapitre explore leur transformation en fibres métalliques, un renfort innovant pour le mortier, combinant performance mécanique et réduction de l'empreinte environnementale. Le processus comprend trois étapes clés : la collecte et la purification des canettes, leur découpe en fibres de géométrie contrôlée, et des traitements de surface visant à optimiser leur adhérence à la matrice cimentaire. En convertissant un déchet courant en ressource technique, cette approche illustre comment l'innovation industrielle peut répondre à des défis écologiques tout en améliorant les propriétés des matériaux de construction (résistance, durabilité, fissuration). Une synthèse des méthodes, des paramètres critiques et des impacts environnementaux clôturera ce chapitre.

### III.2. Collecte et préparation des canettes

#### III.2.1. Tri et nettoyage

La première étape consiste à collecter des canettes en aluminium usagées, principalement issues de flux de recyclage. Le tri sépare l'aluminium des autres métaux (comme l'acier) à l'aide de technologies telles que les séparateurs à courants de Foucault [43]. Un lavage industriel élimine les résidus organiques et les contaminants superficiels, souvent via des bains alcalins (pH 10–12) ou des ultrasons pour dissoudre les colles et les étiquettes [44].



*Figure.III.1. Collecte et préparation des canettes.*

### III.2.2. Élimination des revêtements et impuretés

Les canettes en aluminium sont recouvertes d'une couche de polymère (peinture, vernis) pour protéger le métal. Ce revêtement est éliminé par :



*Figure.III.2. Élimination des revêtements et impuretés.*

- a) **Décapage thermique** : Chauffage à 400–500°C dans un four à atmosphère contrôlée, provoquant la pyrolyse des polymères [43].
- b) **Décapage chimique** : Utilisation de solvants écologiques (ex. solutions à base d'acide citrique) pour éviter les émissions toxiques [44].

### III.3. Procédé de découpe des fibres

#### III.3.1. Techniques de découpe

##### a) Découpe mécanique :

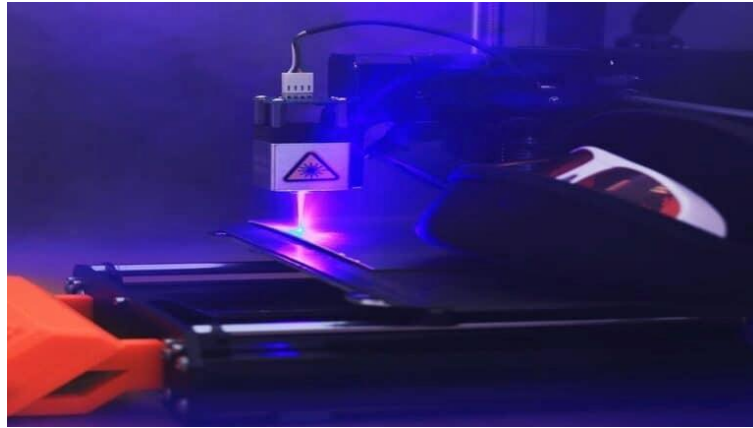
Utilisation de lames rotatives ou de presses pour découper les canettes en bandes, puis en fibres. Cette méthode économique permet de générer des fibres d'une épaisseur comprise entre 0,1 et 0,5 mm, mais présentant parfois des bords irréguliers. [45].



*Figure.III.3. Découpe mécanique.*

**b) Découpe laser :**

Précision au micromètre, idéale pour produire des fibres calibrées (longueur : 20–50 mm, diamètre : 0,1–0,3 mm). Le laser CO<sub>2</sub> (10,6 μm) est couramment employé pour éviter la fusion excessive des bords [46].



*Figure.III.4. Découpe Laser.*

**III.3.2. Influence de la taille et de la forme****a) Longueur des fibres :**

Les fibres longues (> 30 mm) améliorent la résistance à la traction du mortier, tandis que les fibres courtes (< 15 mm) réduisent la propagation des microfissures [47].

**b) Forme texturée :**

Des fibres crénelées ou à surface rugueuse augmentent l'adhérence de 20 à 40 % par rapport aux fibres lisses [46].

**III.3.3. Critères de qualité des fibres métalliques.**

La qualité des fibres métalliques joue un rôle essentiel dans leur performance une fois intégrées à une matrice cimentaire. Pour garantir des propriétés mécaniques optimales et une durabilité accrue, plusieurs critères doivent être rigoureusement respectés.

**a) Tolérances dimensionnelles**

Les dimensions des fibres, notamment leur diamètre et leur longueur, doivent être contrôlées avec précision. Une variation excessive peut altérer leur capacité d'ancrage dans la

matrice, réduisant ainsi leur efficacité en tant qu'armature. Les tolérances admises se situent généralement autour de  $\pm 2$  à 5 % pour la longueur, tandis que le diamètre doit rester constant pour assurer une répartition homogène des contraintes.

#### **b) Uniformité de la surface**

La texture de surface influence directement l'adhérence entre la fibre et le mortier. Une rugosité maîtrisée favorise un bon ancrage, tandis que des défauts tels que des fissures ou des rayures peuvent créer des points faibles. De plus, les revêtements éventuels (galvanisation, laitonage) doivent être appliqués de manière uniforme pour éviter une corrosion prématurée.

#### **c) Distribution de longueur et géométrie**

La géométrie des fibres (droites, ondulées ou à crochets) détermine leur interaction avec la matrice. Une distribution inégale des longueurs ou des formes peut entraîner une hétérogénéité dans le comportement mécanique du composite. Les fibres à extrémités crochetées, par exemple, offrent un meilleur ancrage, mais leur conception doit être cohérente pour une performance reproductible.

#### **d) Pureté et absence de contaminants**

Les résidus de lubrifiants, d'oxydes ou de poussières peuvent nuire à l'interface fibre-mortier, compromettant l'adhésion. Un nettoyage rigoureux en phase de production est donc indispensable pour éviter toute inclusion indésirable susceptible d'affaiblir le matériau.

#### **e) Résistance à la corrosion**

Dans un environnement alcalin comme le mortier (pH  $\sim 13$ ), la compatibilité chimique des fibres est cruciale. Les aciers inoxydables ou protégés par des revêtements anticorrosion sont à privilégier pour assurer une durabilité à long terme, notamment dans les milieux agressifs.

#### **f) Dispersibilité et homogénéité dans la matrice**

Une bonne répartition des fibres dans le mélange est essentielle pour éviter les agglomérats et garantir un renforcement uniforme. Une dispersion optimale permet à chaque fibre de contribuer efficacement à la résistance mécanique globale.

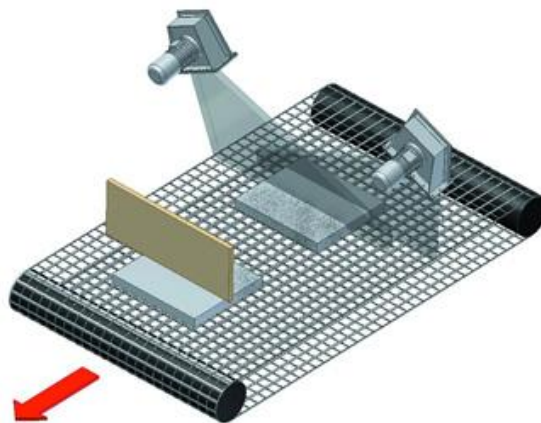
### III.4. Traitement des fibres pour améliorer l'adhérence au mortier

#### III.4.1. Méthodes d'optimisation de l'adhérence des fibres

Pour optimiser l'interface entre les fibres métalliques et le mortier, il est essentiel d'augmenter la rugosité de surface des fibres, favorisant ainsi un ancrage mécanique efficace au sein de la matrice cimentaire. Cette adhérence est déterminante pour transférer les contraintes mécaniques entre la fibre et le mortier, améliorant ainsi la résistance à la traction et la ductilité du matériau composite. Deux méthodes principales sont employées pour atteindre cet objectif : le **grenailage** et le **traitement chimique**.

##### III.4.1.1. Méthodes mécaniques (Grenailage)

Le grenailage consiste à projeter des microbilles d'acier (d'un diamètre compris entre 50 et 200  $\mu\text{m}$ ) à haute vitesse (60–100 m/s) sur la surface des fibres, à l'aide d'une turbine ou d'un compresseur. L'impact de ces billes génère des micro-déformations plastiques, créant une surface rugueuse et irrégulière caractérisée par une rugosité moyenne ( $R_a$ ) de 2 à 5  $\mu\text{m}$ . Les paramètres critiques incluent une pression de projection de 4 à 6 bars pour préserver l'intégrité des fibres, une taille de billes adaptée (50–100  $\mu\text{m}$  pour une rugosité homogène), et une durée d'exposition limitée à 30–60 secondes par lot afin d'éviter la surchauffe.



*Figure.III.5. Grenailage par projection de microbilles.*

Cette méthode offre plusieurs avantages : elle augmente la surface de contact entre la fibre et le mortier jusqu'à 200 %, grâce aux micro-aspérités qui agissent comme des « crochets » physiques, limitant le glissement sous charge. De plus, le processus est exempt de produits

chimiques, ce qui le rend écologiquement compatible. Toutefois, un grenailage trop agressif peut fragiliser les fibres fines, et l'équipement nécessaire engendre un coût énergétique modéré.

#### III.4.1.2 Méthodes chimique (Attaque acide)

Le traitement chimique implique l'immersion des fibres dans une solution diluée d'acide chlorhydrique (HCl à 5 %) pendant 5 à 15 minutes. Les paramètres clés incluent une concentration d'acide strictement contrôlée à 5 %, une température ambiante (20–25 °C) pour modérer la réactivité, et une légère agitation pour uniformiser l'attaque.



*Figure.III.6. Traitement chimique par attaque acide.*

Cette approche présente une rugosité plus uniforme que le grenailage, idéale pour les fibres de petit diamètre (0,1–0,3 mm), tout en éliminant les oxydes résiduels susceptibles de nuire à l'adhérence. Cependant, elle nécessite une gestion rigoureuse des effluents acides, neutralisés avec de la chaux pour respecter les normes environnementales. Un rinçage incomplet pourrait également laisser des ions chlorure résiduels, accélérant la corrosion en milieu humide.

#### III.4.2. Comparaison et impact sur les performances

Le choix entre grenailage et traitement chimique dépend des contraintes techniques et environnementales résumé dans le tableau III.1. Le grenailage, bien que plus coûteux en énergie, convient aux fibres épaisses (> 0,3 mm) et évite les produits chimiques. Le traitement acide, économique et adapté aux fibres fines, exige toutefois une gestion responsable des déchets.

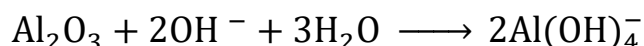
Tableau III.1 Comparaison entre la méthode Grenailage et le Traitement chimique.

Critère	Grenailage	Traitement chimique
Rugosité (Ra)	2–5 µm	3–6 µm
Uniformité	Aspérités aléatoires	Texture régulière
Impact environnemental	Faible (pas de produits chimiques)	Modéré (gestion des acides)
Coût	Élevé (équipement énergivore)	Faible (consommables peu coûteux)
Application idéale	Fibres épaisses (> 0,3 mm)	Fibres fines (< 0,3 mm)

Ces traitements améliorent significativement les propriétés du mortier : l'adhérence accrue augmente la résistance à la traction de 20 à 35 %, tandis que la rugosité optimisée réduit la porosité à l'interface, limitant la pénétration d'agents corrosifs. Ces avancées illustrent comment la transformation de déchets métalliques en renforts performants contribue à une construction durable, alliant innovation technique et circularité des ressources [48-49].

### III.5. Traitement de surface et résistance à la corrosion

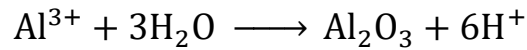
L'aluminium, bien que naturellement protégé par une couche passive d'oxyde ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), est vulnérable en milieu cimentaire alcalin (pH ~13). Les ions hydroxydes ( $\text{OH}^-$ ) attaquent cette couche, provoquant sa dissolution selon la réaction :



Cette dégradation expose le métal sous-jacent à une corrosion accélérée, compromettant la durabilité des fibres dans le mortier. Deux stratégies sont privilégiées pour y remédier :

#### III.5.1. Anodisation : Renforcement de la couche d'oxyde

L'anodisation est un traitement électrochimique où les fibres sont immergées dans un bain d'**acide sulfurique** ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ , 15–20 %) et soumises à une tension continue (15–20 V). L'aluminium agit comme anode, tandis qu'une cathode en plomb ou titane complète le circuit. Sous l'effet du courant, une couche d'oxyde dense et poreuse (10–20 µm d'épaisseur) se forme à la surface.

**Dissolution de l'aluminium :****Formation de l'oxyde :**

Pour garantir une anodisation efficace, plusieurs paramètres doivent être contrôlés. La **température du bain** est maintenue entre 20 et 25 °C, une plage critique pour éviter le colmatage prématuré des pores de la couche d'oxyde, tout en permettant une croissance homogène. La **durée du traitement** varie de 30 à 60 minutes, ajustée en fonction de l'épaisseur souhaitée (généralement 10 à 20 µm). Enfin, un **post-traitement** est essentiel : les pores formés lors de l'anodisation sont scellés par immersion dans de l'eau bouillante (90–100 °C) ou dans un bain de silicate de sodium, améliorant ainsi l'étanchéité et la résistance chimique de la couche protectrice.

Cette méthode présente plusieurs **avantages notables** : d'une part, la couche d'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> formée réduit significativement la perméabilité aux ions hydroxyles (OH<sup>-</sup>), divisant le taux de corrosion par un facteur de 5 à 10 selon les conditions environnementales [49]. D'autre part, la rugosité microscopique induite par l'anodisation améliore l'ancrage mécanique des fibres dans le mortier, renforçant ainsi la cohésion du composite.

Cependant, elle comporte des **limites pratiques** : le procédé d'électrolyse nécessite une consommation énergétique élevée, estimée entre 200 et 300 kWh par tonne de fibres traitées. Par ailleurs, les couches d'oxyde épaisses (supérieures à 20 µm), bien que résistantes à la corrosion, présentent une fragilité accrue, les rendant susceptibles de se fissurer sous des contraintes mécaniques répétées ou des charges de flexion. [50]

**III.5.2. Revêtements hybrides : Barrière physique et chimique**

Les revêtements hybrides combinent une **protection physique** (blocage des agents corrosifs) et une **action chimique** (inhibition de la corrosion), adaptés aux fibres d'aluminium exposées aux milieux alcalins du mortier. Leur application suit des procédés précis, et leurs performances dépendent des matériaux et méthodes choisis.

## Procédés d'application des revêtements

### a) Trempage :

Les fibres sont immergées dans une solution contenant le revêtement, puis retirées et égouttées pour éliminer l'excédent de matériau. Cette méthode, simple et économique, est particulièrement adaptée aux fibres de géométrie complexe (courbures, textures), garantissant une couverture uniforme même sur les surfaces irrégulières.

### b) Pulvérisation :

Le revêtement est appliqué au moyen d'un pistolet pneumatique ou électrostatique, ce qui permet un contrôle précis de l'épaisseur (0,1 à 5  $\mu\text{m}$ ). Cette technique, rapide et automatisable, convient aux productions industrielles à grande échelle, offrant un dépôt homogène et reproductible sur les fibres.

### c) Procédé sol-gel :

Un précurseur chimique (par exemple, le tétraéthoxysilane pour les revêtements à base de silice) est hydrolysé en solution aqueuse ou alcoolique, formant un gel colloïdal. Ce gel est déposé sur les fibres par trempage ou centrifugation. Après séchage à température ambiante, une étape de calcination (200–400 °C) transforme le gel en une couche vitreuse ou céramique dense, offrant une barrière inerte contre les agents corrosifs. [48]

*Tableau III.2 Comparaison entre la méthode Anodisation et le Revêtements hybrides.*

Critère	Anodisation	Revêtements hybrides
<b>Épaisseur</b>	10–20 $\mu\text{m}$	0,1–5 $\mu\text{m}$
<b>Résistance à pH &gt;13</b>	Excellente	Bonne à excellente
<b>Coût</b>	Élevé (énergie, équipement)	Modéré (matériaux spécialisés)
<b>Durabilité mécanique</b>	Risque de fissuration	Flexible et résistant aux chocs
<b>Impact environnemental</b>	Rejets acides ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ )	Faible (si solvants verts)

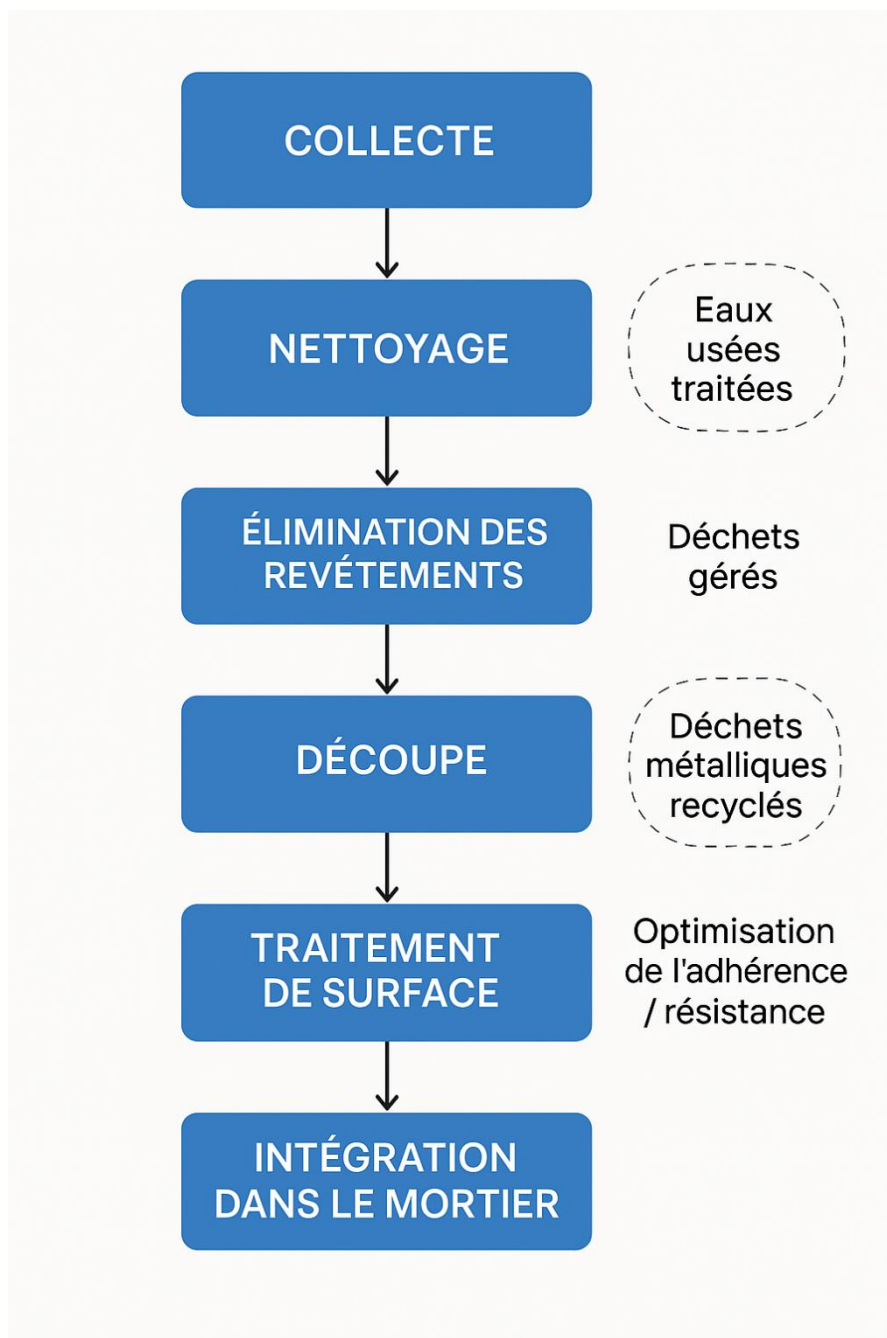
### III.6. Synthèse technique et perspectives

La transformation des canettes en aluminium en fibres destinées au renforcement du mortier représente une innovation majeure dans le domaine des matériaux de construction durables. Ce procédé circulaire permet non seulement de valoriser un déchet abondant, mais aussi d'améliorer les propriétés mécaniques des composites cimentaires. Cette synthèse technique a pour objectif d'évaluer de manière critique l'ensemble de la chaîne de production, depuis la collecte jusqu'à l'intégration des fibres dans le mortier, en mettant en lumière les avantages techniques, les limites économiques et les impacts environnementaux de chaque étape. L'analyse comparative qui suit vise à identifier les points forts du procédé actuel ainsi que les pistes d'optimisation potentielles, afin de guider les futures améliorations industrielles vers une plus grande efficacité et durabilité.

*Tableau III.3 Analyse comparative des étapes du procédé*

Étape	Avantages	Inconvénients	Coût	Impact environnemental
<b>Collecte</b>	- Source abondante (recyclage) - Réduction des déchets	- Hétérogénéité des matières premières	Faible	Positif (économie circulaire)
<b>Nettoyage</b>	- Élimination des contaminants - Préparation pour les étapes suivantes	- Consommation d'eau et d'énergie - Traitement des eaux usées nécessaire	Modéré	Modéré (gestion des effluents)
<b>Élimination des revêtements</b>	- Surface propre pour l'adhérence - Compatibilité avec les traitements ultérieurs	- Décapage thermique énergivore - Décapage chimique génère des déchets	Élevé (thermique/chimique)	Élevé (émissions CO <sub>2</sub> ou produits chimiques)
<b>Découpe</b>	- Précision dimensionnelle - Adaptabilité aux besoins (longueur/forme)	- Usure des outils - Coût élevé pour le laser	Modéré (mécanique) Élevé (laser)	Faible (déchets recyclables)
<b>Traitement de surface (grenaillage, attaque acide, anodisation, revêtements)</b>	- Améliore l'adhérence et la résistance à la corrosion - Durée de vie prolongée	- Coût énergétique (anodisation) - Gestion des déchets (attaque acide)	Élevé	Variable (faible pour grenaillage, élevé pour traitements chimiques)
<b>Intégration dans le mortier</b>	- Renforcement homogène - Améliore les propriétés mécaniques	- Risque d'agglomération si dispersion mal maîtrisée	Faible	Neutre

Figure.III.7. Schéma global du processus.



La transformation des canettes en aluminium en fibres pour mortier allie performance technique et durabilité. Les défis restants (coût, impact environnemental) ouvrent la voie à des innovations industrielles, notamment par l'automatisation et les matériaux écologiques. Cette approche circulaire positionne le procédé comme une solution prometteuse pour la construction durable.

*Chapitre IV :*  
*Techniques expérimentales et*  
*Préparation des échantillons.*

### IV.1. Introduction

Les mortiers fibrés représentent aujourd'hui un champ de recherche dynamique, mobilisant des équipes scientifiques internationales pour améliorer les performances des matériaux de construction tout en répondant aux enjeux de durabilité. Parmi les renforts étudiés, les fibres métalliques, et particulièrement celles en aluminium, suscitent un intérêt croissant en raison de leur légèreté, de leur résistance à la corrosion et de leur potentiel de recyclage.

Les travaux pionniers de Banthia et Sheng [51] en 1996 ont ouvert la voie à l'utilisation des fibres métalliques dans les matrices cimentaires, démontrant leur capacité à améliorer la ténacité et à limiter la propagation des fissures. Plus récemment en 2018, des équipes comme celle de Siddique et al. [52] à l'Université de Wisconsin-Milwaukee (États-Unis) ont exploré l'intégration de déchets d'aluminium industriels dans le béton, soulignant une augmentation significative de la résistance en compression et en flexion. Parallèlement, Almusallam et al. de l'Université King Saud [53] ont quantifié l'impact des fibres d'aluminium recyclées sur la ductilité des composites, mettant en évidence une amélioration de 20 à 30 % selon le taux d'incorporation.

En 2020, le groupe de recherche dirigé par Ferrara [54] à l'École Polytechnique de Milan (Italie) a innové en utilisant des fibres d'aluminium issues de l'industrie aéronautique, combinant caractérisation microstructurale et modélisation numérique pour optimiser leur dispersion dans la matrice. Ces études soulignent toutefois la nécessité de prétraitements spécifiques (nettoyage chimique, découpe) pour maximiser l'adhérence fibre-matrice, un défi technique relevé en 2021 par Zhang et al.[55] de l'Université de Toronto (Canada) via des protocoles d'activation de surface.

En 2018 sur le plan local, les travaux de Hemil et Nougari [56] à l'Université Mohamed Boudiaf de M'sila ont jeté les bases de l'utilisation de fibres plastiques recyclées dans les mortiers, en explorant notamment les synergies entre fibres plastiques et billes de polystyrène. Cependant, l'emploi de fibres d'aluminium issues de cannettes usagées, bien que prometteur, reste marginal dans la littérature. Seules quelques études en 2022, comme celle de Khan et al.[57] à l'Université de Malaisie, ont évalué leur potentiel, révélant une résistance à la flexion accrue de 18 % pour un taux de 1,5 % en masse.

Ce chapitre s'inscrit dans cette lignée en proposant une méthodologie rigoureuse pour valoriser des cannettes en aluminium, déchet urbain abondant mais sous-exploité, dans des mortiers techniques.

## IV.2. Mortier

### IV.2.1. La définition

Le mortier est un matériau de construction préparé à partir d'un mélange de liant (tel que le ciment ou la chaux), de sable, d'eau et, dans certains cas, d'adjuvants. Ces composants sont rigoureusement dosés pour obtenir une pâte homogène et malléable, idéale pour son application. [51] Utilisé principalement en maçonnerie, il permet d'assembler des éléments comme les briques, les pierres ou les parpaings, mais aussi de créer des revêtements ou des enduits pour les façades.



*Figure.IV.1. Exemple d'un gâchage de mortier.*

### IV.2.2. Constituants des mortiers

Les mortiers peuvent être considérés comme des micro-bétons, car ils partagent les mêmes principes de composition. Leur formulation inclut systématiquement du ciment, du sable et de l'eau, auxquels s'ajoutent parfois des adjuvants pour modifier certaines propriétés. Cette composition est schématisée dans la figure IV.2. [58]



*Figure.IV.2. Composition d'un mortier.*

### a) Le Ciment

On utilise généralement des liants hydrauliques qui peuvent être le ciment (dans notre cas c'est Le ciment Matine Lafarge de M'sila est un ciment Portland de type CEM I 42.5), comme montré dans figure IV.3 leur caractéristique physique et chimique donné dans les Tableau IV-1 et 2, cette dernière est une matière pulvérulente à base de silicate et d'aluminate, et de la chaux obtenue par la cuisson. Généralement, on peut utiliser : Les ciments (normalisés et spéciaux) ; Les liants à maçonner ; Les chaux (hydrauliques naturelles et éteintes). [59]



Figure.IV.3. Le ciment Matine Lafarge de M'sila.

Tableau IV.1 : Caractéristiques physiques.

Propriété	Valeur moyenne	Détails/Normes
<b>Finesse (Blaine)</b>	320–380 m <sup>2</sup> /kg	Surface spécifique optimale pour une réactivité équilibrée.
<b>Temps de prise</b>		
<b>Initiale</b>	45–60 minutes	Début de rigidification de la pâte.
<b>Finale</b>	6–8 heures	Durée totale de prise.
<b>Résis. à la compression</b>		*Mesurée sur mortier normalisé (EN 196-1)*
<b>2 jours</b>	≥ 15 MPa	Résistance précoce.
<b>7 jours</b>	≥ 30 MPa	Résistance intermédiaire.
<b>28 jours</b>	≥ 42,5 MPa	Résistance nominale garantie.
<b>Densité</b>	3,10–3,15 g/cm <sup>3</sup>	Masse volumique du ciment en poudre.
<b>Chaleur d'hydratation</b>	290–330 kJ/kg (à 7 j)	Énergie libérée pendant la réaction eau-ciment.

Tableau IV.2 : Caractéristiques chimiques.

Composant	Teneur moyenne	Rôle/Fonction
Silice (SiO <sub>2</sub> )	18–22 %	Participe à la formation du gel C-S-H, responsable de la résistance mécanique.
Alumine (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	4–6 %	Influence la résistance précoce et la réactivité.
Oxyde de fer (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	2–4 %	Impacte la couleur (gris) et stabilise les phases minérales.
Chaux (CaO)	60–65 %	Composant principal du clinker, essentiel à l'hydratation.
Magnésie (MgO)	≤ 5 %	Limité pour éviter les expansions tardives.
Sulfates (SO <sub>3</sub> )	≤ 3,5 %	Régule le temps de prise et la formation d'ettringite.
Perte au feu (LOI)	≤ 3 %	Indicateur de la teneur en matières organiques ou volatiles.

### b) Le sable

Le Tableau IV.3 représente *récapitulatif des propriétés du* sable fin de Boussaada (0/2 mm), extrait d'une carrière locale de M'sila, est sélectionné pour sa qualité et son accessibilité. Après extraction, il subit un tamisage rigoureux éliminant les particules > 2 mm, assurant une granulométrie homogène adaptée aux mortiers techniques. Un prétraitement minutieux inclut un lavage à l'eau claire pour éliminer argile et poussières, suivi d'un séchage à 105 °C pendant 24 h, supprimant l'humidité résiduelle pour éviter les variations de comportement du mortier. Conforme à la norme EN 933-1 (module de finesse = 2,3), sa granulométrie équilibrée (grains entre 0,08 et 2 mm) optimise la compacité, réduit les vides intergranulaires et limite le retrait lors du durcissement, améliorant la résistance mécanique.



Figure IV.4. Le sable de Boussaada.

Tableau IV.3: tableau récapitulatif des propriétés du sable de Boussaâda (M'Sila). [60]

Propriété	Description
Origine	Alluvionnaire (dépôts d'oueds et carrières locales).
Granulométrie	<b>Moyen à fin</b> (0.1–2 mm) : 70–85 %. <b>Fines (&lt; 0.063 mm)</b> : 5–15 %.
Paramètres géotechniques	<b>Cu (Coeff. d'uniformité)</b> : 2–4.
Classification USCS	<b>SP</b> (sable pauvrement gradué) ou <b>SM</b> (sable limoneux).
Teneur en argiles	Variable (5–15 %), dépend du lavage.
Densité	Environ 1.5–1.6 t/m <sup>3</sup> (sec).
Perméabilité	Moyenne à élevée ( $k \approx 10^{-3}$ à $10^{-4}$ cm/s).
Applications typiques	Béton (lavé), <b>mortiers</b> , travaux routiers, remblais.
Avantages	Disponibilité locale, coût économique, adapté aux travaux généraux.
Limitations	Teneur en fines élevée si non lavé $\Rightarrow$ risque de retrait dans le béton

### c) L'eau de gâchage

L'eau est un composant indispensable du béton et du mortier, influençant toutes les étapes de leur cycle de vie grâce à ses propriétés physico-chimiques et mécaniques. Introduite lors du mélange, elle remplit deux rôles majeurs :

- **Un rôle physique**, en conférant au matériau frais une plasticité et une fluidité (propriétés rhéologiques) facilitant sa mise en œuvre et son moulage ;
- **Un rôle chimique**, en activant la réaction d'hydratation du liant, essentielle au durcissement et à la résistance finale.

Le dosage de l'eau représente un compromis complexe : une réduction de sa quantité améliore la résistance mécanique, tandis qu'une augmentation favorise l'ouvrabilité. Cette recherche d'équilibre justifie l'utilisation d'adjuvants, qui permettent d'optimiser ces propriétés sans altérer les performances du matériau. [59]

### d) L'adjuvant

Les adjuvants sont des produits chimiques de plus en plus courants lors de la fabrication du béton. Ajoutés à faible dose lors de la préparation du béton, ces produits améliorent certaines caractéristiques de ce matériau (l'étanchéité ou le temps de prise par exemple). Les différents types d'adjuvants qui existent vous permettront d'obtenir un béton avec les caractéristiques spécifiques que vous souhaitez lui donner. [61]

Les principaux adjuvants : (Accélérateur de prise, Accélérateur de durcissement, Retardateur de prise, Plastifiant, Super plastifiant, Entraîneur d'air et Pigments)

### IV.3. Les fibres d'aluminium

#### IV.3.1. Les fibres de cannettes en aluminium

Les fibres métalliques intégrées dans le mortier fibré dans cette étude sont issues d'une démarche innovante de *recyclage de cannettes en aluminium*, transformant ainsi des déchets courants en ressource technique. Collectées principalement auprès de *restaurants rapides et d'établissements de restauration collective*, ces cannettes font l'objet d'un tri rigoureux afin d'éliminer les éléments non aluminiques (bouchons en plastique, résidus organiques).



*Figure.IV.5. Canneltes en aluminium.*

#### IV.3.2. Processus de transformation

##### a) Procédure de Découpe

La transformation des cannettes en fibres d'aluminium est réalisée à l'aide d'une cisaille manuelle, un outil adapté aux contextes artisanaux ou aux laboratoires disposant de moyens limités (Voir la Figure IV.6). Malgré l'absence d'automatisation, une méthodologie rigoureuse permet d'obtenir des bandes aux dimensions standardisées de **4 cm de longueur** et **0.4 cm de largeur** (Figure.IV.7.), calibrées pour répondre aux exigences techniques du béton fibré.



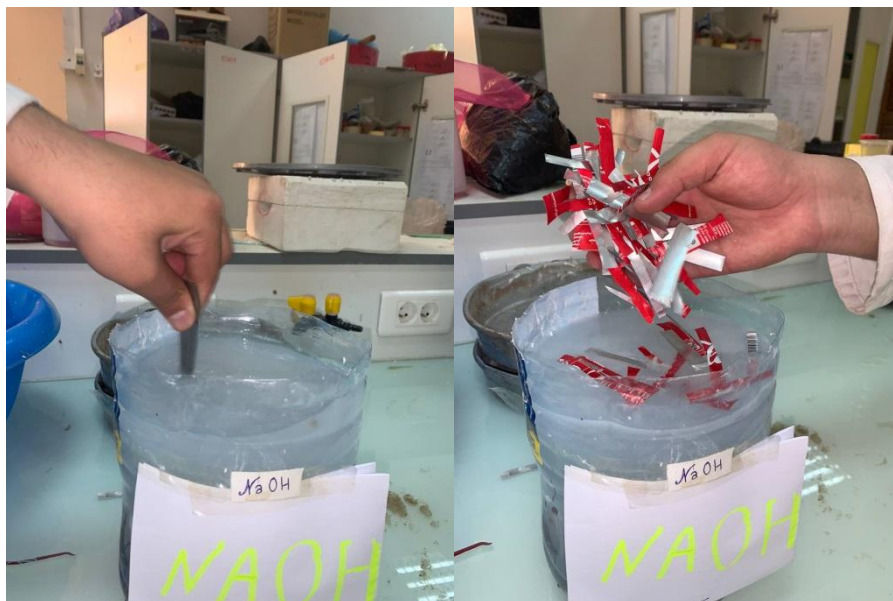
*Figure.IV.6. Procédure de découpe des Canneltes en aluminium.*



*Figure.IV.7. Fibres des Cannelles en aluminium.*

### b) Procédure de lavage

Dans le cadre expérimental, les cannettes sont nettoyées selon un protocole adapté aux contraintes d'un laboratoire de moulage. La méthode débute par la préparation d'un bain alcalin, où une solution à base de soude caustique (NaOH à 2 %) est mélangée dans un bac en polypropylène résistant aux produits chimiques (Figure IV.8.). La température du bain est 25°C.



*Figure.IV.8. Procédure de lavage des Cannelles en aluminium.*

Les cannettes, après avoir été placées dans le bain alcalin, y restent immergées pendant **30 minutes**. Durant cette phase, une agitation manuelle est réalisée à intervalles réguliers (toutes les 5 minutes) à l'aide d'une tige en verre ou d'une spatule résistante aux produits chimiques. Cette manipulation active permet de favoriser le décollement des résidus

organiques, notamment les colles, les étiquettes et les graisses, qui réagissent avec la solution alcaline (NaOH à 2 %) pour se dissoudre progressivement.

Une fois le décapage terminé, les cannettes subissent un **rinçage neutre** dans un bac de décantation rempli d'eau déminéralisée. Trois cycles successifs de rinçage éliminent toute trace de soude caustique, et la neutralité de surface est confirmée par un test au papier pH, visant un équilibre proche de pH 7.

Enfin, les cannettes sont transférées dans une étuve de laboratoire pour un **séchage contrôlé** à 60°C pendant 2 heures. Une circulation d'air forcé au sein de l'étuve prévient toute oxydation prématurée de l'aluminium, préservant ainsi l'intégrité du matériau pour les étapes ultérieures de découpe et de moulage.

Cette procédure, bien que réalisée à échelle réduite, reproduit fidèlement les principes industriels tout en intégrant des mesures de précision et de sécurité adaptées au contexte académique.

#### **IV.4. Elaboration des composites**

##### **IV.4.1. Démarche expérimentale**

Dans un premier temps, notre étude s'est focalisée sur l'élaboration d'un matériau composite innovant à base de mortier renforcé par des fibres d'aluminium. Le processus a débuté par un gâchage minutieux du mortier, auquel ont été incorporées progressivement les fibres métalliques afin d'obtenir une dispersion homogène. Les opérations ont été réalisées au sein du laboratoire de moulage de l'Université Mohamed Boudiaf de M'sila, équipé d'une presse à compression thermique permettant de façonner les échantillons selon des paramètres contrôlés.

##### **IV.4.2. Objectifs et méthodologie**

L'objectif principal consistait à analyser l'impact de la teneur en fibres d'aluminium (variant de 1 % à 2 % en masse) sur les propriétés mécaniques du composite, notamment la résistance en flexion et comprissions. Pour cela, trois formulations distinctes ont été développées (référencées dans le Tableau IV.04), chacune correspondant à un ratio mortier/fibres spécifique. Pour les besoins de notre étude expérimentale nous avons préparé trois mortiers :

- Un Mortier ordinaire désigné par MO : il correspond à un mélange ordinaire formulé à partir de classes granulaires : sable (Tableau IV-5).

• deux Mortier fibrés désignés respectivement par MF1 et MF2: c'est des mélanges formulés à partir de classes granulaires : sable et les fibres des cannettes, dont les pourcentages des fibres sont 1% et 2% de la masse du mortier.

**Tableau IV.4 : Compositions des différents pourcentages de mortiers réalisés.**

N°	Taux du Mortier	Taux des fibres Al	Constituants	Désignations
01	100%	0%	Mortier	MO
02	99%	01%	Mortier-Fibres Al	MF1
03	98%	02%	Mortier-Fibres Al	MF2

**Tableau IV.5: Composition de Mortier Témoin (Taux des fibres Al 0%).**

Constituants	Masse	Taux
<i>Ciment</i>	<i>450 g</i>	<i>22%</i>
<i>Sable</i>	<i>1350 g</i>	<i>66%</i>
<i>Eau</i>	<i>250 g</i>	<i>12%</i>

Cette phase préparatoire ouvre la voie à des essais mécaniques comparatifs (flexion, compression,...), dont les résultats permettront de valider le potentiel de ce composite pour des applications en génie civil ou en renforcement de structures légères.

#### IV.4.3. Confection des éprouvettes

Conformément à la norme EN 196-1, et pour les besoins de notre étude et selon la nature de l'essai à réaliser, on a utilisé respectivement pour la confection des éprouvettes des moules prismatique ciment (4×4×16) cm pour essais de Compression /Flexion.



**Figure.IV.9. Éprouvettes prismatiques**

#### IV.4.4. Préparation des éprouvettes

Le malaxage manuel du mortier est une méthode utilisée pour préparer des mortiers de ciment homogènes, notamment lors de la fabrication d'échantillons pour des essais mécaniques comme la flexion trois points. Bien qu'effectuée manuellement, cette technique suit des protocoles rigoureux afin d'assurer la reproductibilité des résultats, conformément aux normes EN 196-1 et ASTM C305.

##### *a) Réalisation du béton témoin*

Les étapes de malaxage sont :

- Préparation des quantités nécessaire pour le malaxage.
- Introduction des granulats dans le malaxeur (sable), faire le malaxage pendant 2 min afin d'assurer une bonne dispersion des granulats du mortier.
- Introduction du ciment et faire un malaxage pendant 1min
- Introduction de l'eau et faire le malaxage pendant 2min.

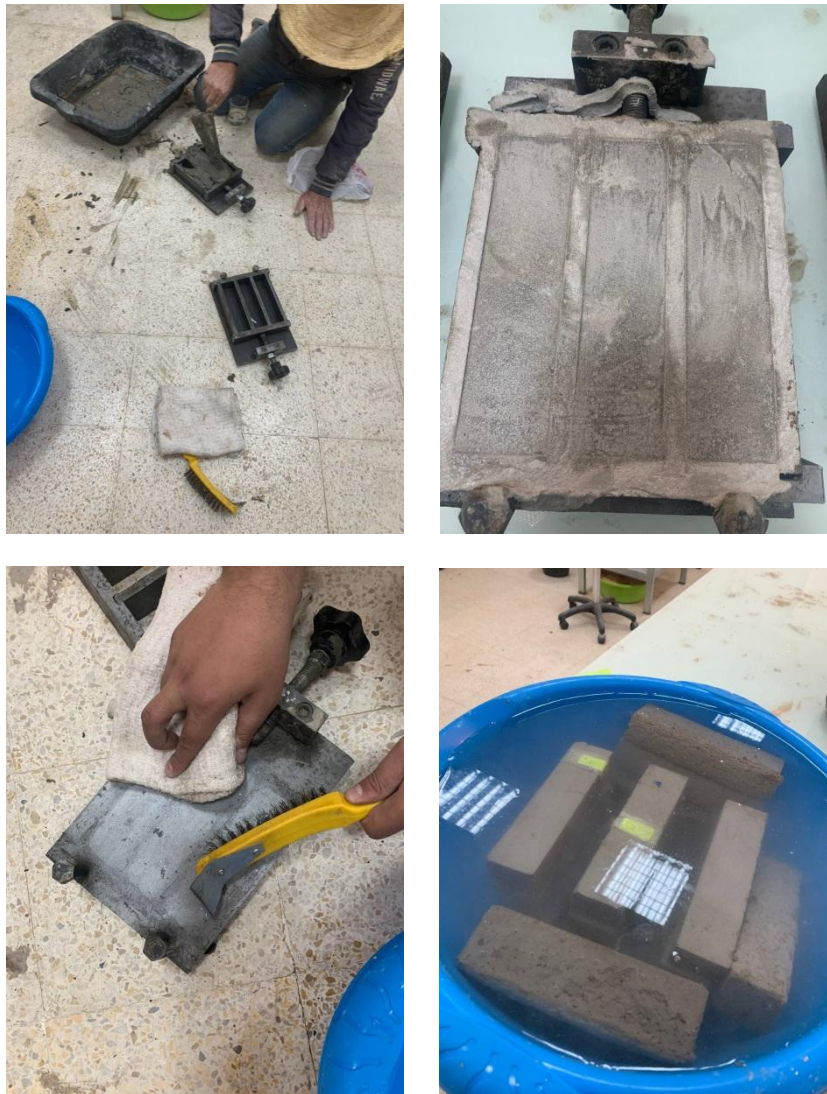
##### *b) Réalisation du mortier de fibres*

Les étapes de malaxage sont :

- Préparation des quantités nécessaire pour le malaxage.
- Introduction des granulats dans le malaxeur (sable), faire le malaxage pendant 2 min afin d'assurer une bonne dispersion des granulats du mortier.
- Introduction du ciment et faire un malaxage pendant 1min
- Introduction de l'eau et faire le malaxage pendant 2min.
- Introduction des fibres et faire le malaxage jusqu'à obtenir béton homogène

#### II.4.5. Moulage et démoulage

Après l'opération de malaxage, le mortier est prêt à l'emploi. Le mortier est introduit dans des moules préalablement graissés par de l'huile afin de faciliter le démoulage après 24 heures de leur coulage.



*Figure.IV.10. Mise en place du béton et la conservation des éprouvettes.*

Le remplissage des moules est exécuté en deux couches, pour chaque couche on a appliqué 25 coups afin d'assurer un remplissage parfait du moule. A la fin du coulage, il faut araser les éprouvettes à l'aide d'une truelle. La face supérieure de l'éprouvette doit être lisse et bien finie. Après démoulage, les éprouvettes sont entreposées dans de l'eau jusqu'au moment de l'essai.

## IV.5. Techniques de caractérisation des matériaux élaborés

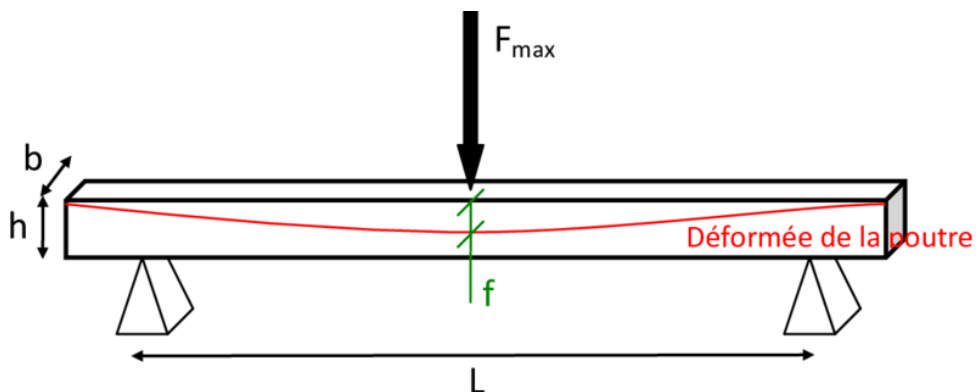
### IV.5.1. Tests mécaniques

Cette section expose les **méthodes expérimentales normalisées** (ASTM, EN) mises en œuvre pour évaluer les propriétés mécaniques des matériaux développés, avec un focus sur leur comportement sous sollicitations critiques :

- **Essais de flexion trois points** pour déterminer la *résistance à la rupture ténacité*.
- **Essais de compression uniaxiale** afin de mesurer la *contrainte maximale supportée* et le *module d'élasticité*.

### IV.5.2. Essais de Flexion (flexion trois points)

Comme illustré dans la figure IV.11, cette méthode normalisée permet de déterminer la **résistance à la flexion** (module de rupture, MOR) et le comportement mécanique de matériaux fragiles ou semi-fragiles, tels que les bétons, les mortiers, les céramiques ou les composites. L'essai consiste à appliquer une charge progressive au centre d'une éprouvette prismatique (par exemple 4×4×16 cm<sup>3</sup>), reposant sur deux appuis latéraux, jusqu'à sa rupture.



*Figure.IV.11. Schéma de l'éprouvette de flexion*

La résistance à la flexion ( $\sigma_f$ ) a été calculée en utilisant :

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2}$$

Où

- F : Charge maximale appliquée avant rupture (N),
- L : Distance entre les appuis (mm),
- b : Largeur de l'éprouvette (mm),
- h : Hauteur de l'éprouvette (mm).

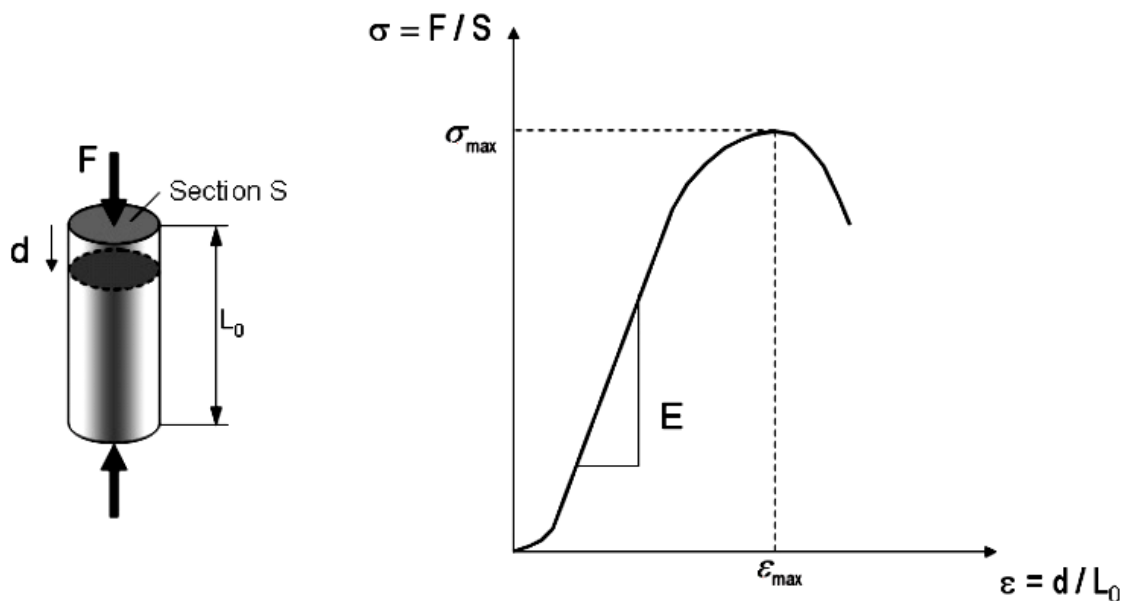
Le module de flexion ( $E_f$ ) a été calculé en utilisant :

$$E_f = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{L^3 \cdot m}{4bd^3}$$

$m$  = pente de la courbe charge-déflexion (N/mm).

### IV.5.3. Essais de compression uniaxiale (Uniaxial Compression Test)

Tel qu'illustré dans la figure IV.12, cet essai mécanique standardisé permet d'évaluer la résistance à la compression et le comportement sous chargement axial de matériaux fragiles ou semi-fragiles, tels que les bétons, les mortiers, les roches, les céramiques ou certains alliages métalliques. Conformément aux normes internationales, il consiste à appliquer une charge croissante et uniforme, à l'aide d'une presse hydraulique ou mécanique, sur une éprouvette cylindrique ou prismatique jusqu'à sa rupture.



*Figure.IV.12. Schéma de l'essai de compression.*

Formule de la résistance à la compression.

$$\sigma_c = \frac{F_{max}}{S}$$

Où

- $\sigma_c$  : Contrainte de compression maximale (MPa).
- $F_{max}$  : Charge maximale avant rupture (N).
- $S$  : Section transversale initiale de l'éprouvette (mm<sup>2</sup>).

À l'issue des étapes méthodologiques décrites dans ce chapitre – incluant la préparation rigoureuse des matériaux (ciment, sable, fibres d'aluminium recyclées), l'élaboration des composites à taux de fibres contrôlés (0 %, 1 %, 2 %), et la fabrication d'éprouvettes normalisées – les échantillons ont été soumis à une série d'essais mécaniques conformes aux normes EN 196-1 et ASTM C109. Ces tests, centrés sur la flexion trois points et la compression uniaxiale, ont généré des données quantitatives permettant d'évaluer l'efficacité des fibres en aluminium comme renforts structurels.

*Chapitre V*  
*Résultats et discussions*

## V.1. Introduction

Ce chapitre présente l'analyse critique des résultats expérimentaux issus des essais de flexion trois points et compression uni axiale menés sur les mortiers fibrés aux fibres d'aluminium recyclé (0%, 1%, 2%). Conformément aux objectifs du mémoire, ces travaux évaluent rigoureusement l'impact mécanique du renfort fibreux issu de cannettes usagées, transformées via un procédé innovant de recyclage incluant lavage alcalin, découpe mécanique et grenailage. L'étude repose sur une synergie méthodologique entre le Laboratoire de Moulage (Génie Mécanique) et le Laboratoire de Génie Civil du Hall de Technologie de l'Université Mohamed Boudiaf de M'sila. Le premier a optimisé la transformation des déchets en fibres aux dimensions contrôlées (4 cm × 0.4 cm) et à la rugosité adaptée, tandis que le second a conduit les essais normalisés.

La structure de ce chapitre suit une progression logique : les résultats des essais de flexion sont d'abord présentés et interprétés, suivis de ceux de la compression. Une discussion intégrée croise ensuite ces données pour dégager des corrélations entre les traitements appliqués aux fibres, les propriétés mécaniques observées et les applications potentielles en génie civil. Cette démarche vise à valider le potentiel des fibres recyclées comme solution éco-innovante pour des infrastructures résilientes, notamment dans les contextes sismiques ou industriels algériens, tout en répondant aux impératifs d'économie circulaire développés tout au long de ce travail.

## V.2. Eprouvettes d'aluminium

Les courbes de traction des éprouvettes en aluminium extraites de cannettes de boisson ont été obtenues conformément à la norme ISO 6892, qui spécifie les méthodes d'essai des matériaux métalliques sous traction. Ces courbes sont essentielles pour évaluer les propriétés mécaniques des matériaux, telles que la résistance maximale à la traction, la ductilité, et l'élasticité, qui sont cruciales pour déterminer la performance des matériaux recyclés dans des applications industrielles.

### V.2.1. Résultats de traction des éprouvettes d'aluminium

La figure V.1 représente les courbes de traction obtenues pour les quatre premières éprouvettes (EPV1 à EPV4) se caractérisent par deux phases principales :

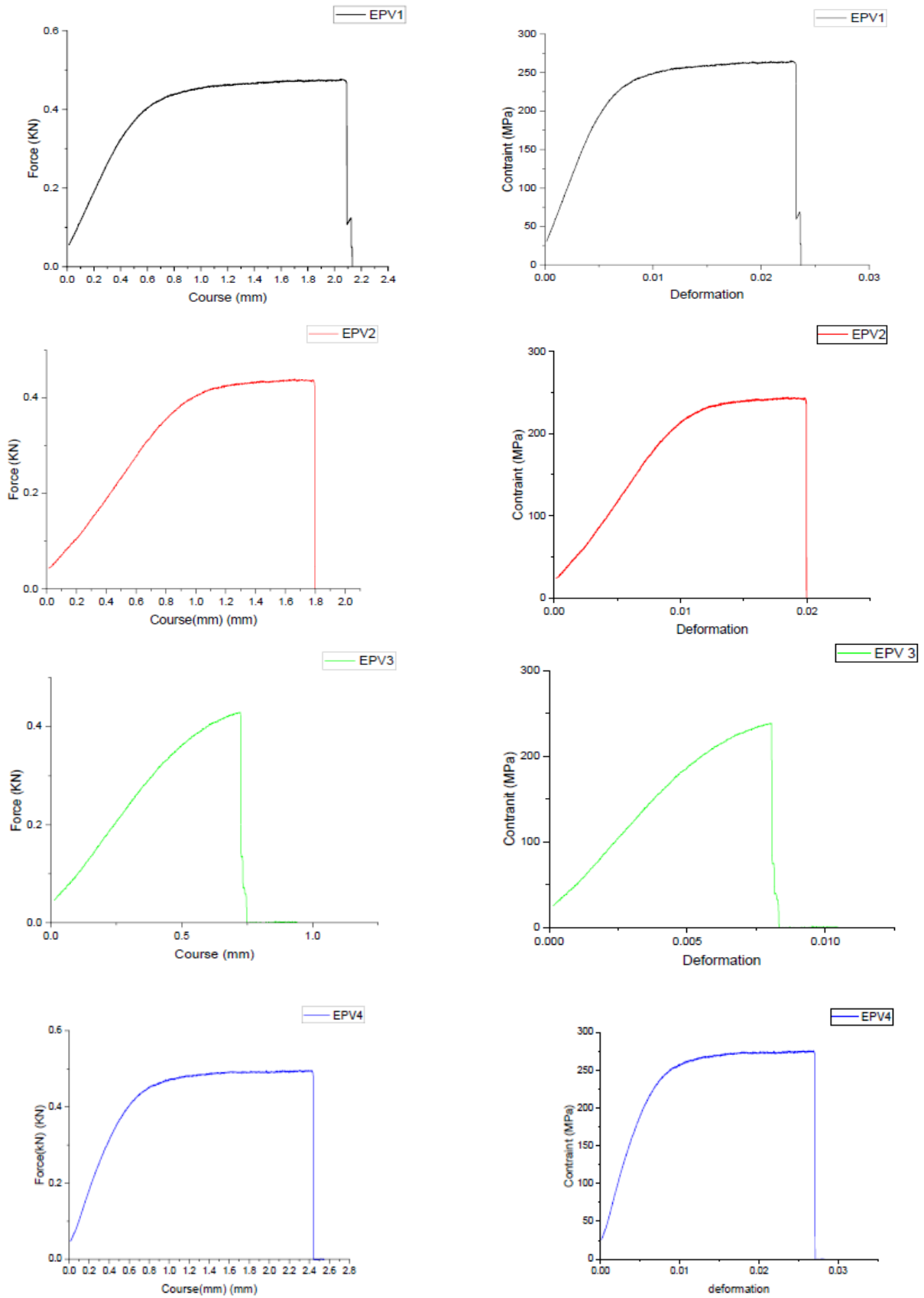


Figure V.1. Courbes de traction obtenues pour les quatre premières éprouvettes (EPV1 à 4)

Les courbes de traction obtenues pour les quatre premières éprouvettes (EPV1 à EPV4) se caractérisent par deux phases principales :

1. **Phase élastique** : La première partie de la courbe, où la contrainte (en MPa) est linéairement proportionnelle à la déformation (en mm). Durant cette phase, l'aluminium se déforme de manière réversible, c'est-à-dire que si la force est relâchée, le matériau reprend sa forme initiale. Cette phase correspond au comportement élastique du matériau, défini par le module de Young, qui est une mesure de la rigidité du matériau.
2. **Phase plastique** : Après le seuil d'élasticité, la courbe montre une déformation plus importante pour une faible augmentation de la contrainte. Cela correspond à la déformation plastique où le matériau subit une altération permanente de sa structure interne. Cette phase mène, à une certaine force critique, à la rupture du matériau.

### V.2.2. Analyse des propriétés mécaniques des éprouvettes

Les propriétés les plus pertinentes pour cette analyse sont la résistance à la traction maximale (**Rm**) et la force maximale atteinte (**Fm**).

*Tableau V.1 : Résistance à la traction maximale (Rm) et la force maximale atteinte (Fm).*

N Eprouvettes	Rm (MPa)	Fm (KN)
EPV1	265	0.477
EPV2	244.333	0.4398
EPV3	238.5	0.4293
EPV3	275.5	0.4959

#### 1. EPV1 :

- **Rm = 265 MPa** et **Fm = 0.477 kN**
- L'EPV1 présente une résistance à la traction modérée, ce qui est caractéristique pour un matériau en aluminium récupéré des canettes. La force maximale indique que l'éprouvette a montré une bonne capacité à supporter la traction avant la rupture.

## 2. EPV2 :

- **Rm = 244.33 MPa et Fm = 0.4398 kN**
- Comparée à l'EPV1, l'EPV2 présente une résistance légèrement inférieure et une force maximale plus faible. Cela peut indiquer une certaine variation dans la qualité du matériau provenant de la canette ou dans les conditions de préparation de l'éprouvette.

## 3. EPV3 :

- **Rm = 238.5 MPa et Fm = 0.4293 kN**
- Cette éprouvette montre une résistance plus faible que les précédentes, ce qui pourrait être le résultat d'une hétérogénéité du matériau ou d'une variation dans le procédé de fabrication des canettes.

## 4. EPV4 :

- **Rm = 275.5 MPa et Fm = 0.4959 kN**
- L'EPV4 présente la meilleure performance en termes de résistance à la traction et de force maximale, suggérant que, dans ce cas, le matériau en aluminium récupéré possède des propriétés mécaniques proches de celles des alliages d'aluminium standards, ce qui pourrait être dû à un meilleur traitement ou à des caractéristiques intrinsèques du lot d'aluminium utilisé.

Les résultats de ces essais mécaniques montrent une variation de la résistance à la traction parmi les différentes éprouvettes, ce qui est courant pour des matériaux recyclés, comme ceux provenant des canettes. Ces variations peuvent être attribuées à plusieurs facteurs, notamment :

- **Qualité de l'aluminium récupéré** : Les canettes peuvent provenir de lots variés avec des traitements thermiques et mécaniques différents.
- **Effet du recyclage** : Le recyclage des canettes peut altérer la microstructure du matériau, en particulier si le processus n'est pas optimal, ce qui peut réduire la résistance à la traction et la ductilité.
- **Hétérogénéité du matériau** : Le recyclage peut également introduire des impuretés ou des défauts dans la structure cristalline de l'aluminium, entraînant des variations dans ses propriétés mécaniques.

Il est également pertinent de noter que l'EPV4, qui montre une performance élevée, pourrait indiquer que les canettes en aluminium, si elles sont correctement traitées et préparées, peuvent offrir des propriétés mécaniques compétitives pour des applications industrielles.

Les résultats de ces essais de traction permettent de conclure que l'aluminium récupéré des canettes de boisson peut présenter des propriétés mécaniques variées, en fonction des conditions de fabrication et du traitement du matériau. Cependant, dans des cas optimaux, cet aluminium recyclé peut avoir des performances comparables à celles des alliages d'aluminium purs, ce qui le rend viable pour de nombreuses applications industrielles.

Pour une valorisation plus poussée des matériaux issus de canettes de boisson en aluminium, il serait pertinent de mener des études supplémentaires sur les traitements thermiques et mécaniques à appliquer au matériau recyclé, afin d'optimiser ses propriétés mécaniques et de maximiser son potentiel dans diverses applications.

### V.3. Résultats des essais de flexion trois points

#### V.3.1. Dispositif expérimental et protocole

##### *a) Machine utilisée*

Les essais de flexion trois points ont été réalisés sur une machine d'essais universelle de marque **modèle 3369 (Voire figure V.2)**, installée dans le Laboratoire de Génie mécanique (bancs d'essais 106 à 115) du Hall de Technologie. Cet équipement de haute précision, d'une capacité maximale de 50 kN, est spécialement conçu pour caractériser le comportement mécanique des matériaux fragiles et semi-fragiles selon la norme ASTM C78. La machine intègre une cellule de charge statique calibrée de 10 kN avec une précision certifiée de  $\pm 0.5\%$ , garantissant des mesures de force fiables dans la plage typique des essais sur mortier (0-8 kN). Le système de déplacement est piloté par un moteur électrique à contrôle numérique, permettant des vitesses de déformation extrêmement stables de 0,001 à 500 mm/min, ajustée ici à 0,2 mm/min pour simuler des conditions de chargement quasi-statique.



**Figure V.2. Machine d'essais universelle installée dans le Laboratoire de Génie mécanique**

La mesure des déformations repose sur un extensomètre laser non-contact de série **Instron 2663-281**, positionné latéralement pour enregistrer la flèche au centre de l'éprouvette avec une résolution de 0,01 mm. Cet instrument évite tout contact mécanique susceptible d'influencer le comportement du mortier fraîchement démoulé. L'ensemble est piloté par le logiciel **Bluehill 3**, qui assure non seulement l'acquisition synchrone des données (force, déplacement, temps) à une fréquence de 10 Hz, mais aussi le contrôle en temps réel des paramètres d'essai et la détection automatique de la rupture.

### **b) Configuration mécanique spécifique**

Le montage expérimental utilise une configuration à trois points conforme à la norme ASTM C78, avec deux appuis cylindriques inférieurs en acier trempé (diamètre 10 mm, dureté Rockwell 62 HRC) et un piston de chargement supérieur à tête hémisphérique (diamètre 5 mm). La distance entre appuis (*span length*) est fixée à 100 mm pour des éprouvettes prismatiques de dimensions 40×40×160 mm, soit un rapport portée/hauteur de 2.5 comme exigé pour limiter les effets de cisaillement. Les appuis sont équipés de rotules autoadaptatives éliminant les contraintes parasites dues aux défauts de parallélisme mineurs, tandis que des blocs de mâchoires en carbure de tungstène assurent un maintien sans glissement.

### c) Procédure expérimentale

#### Étape 1 : Préparation des éprouvettes

- Conditionnement à  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  / HR  $50\% \pm 5\%$  pendant 24h
- Marquage position appuis au feutre (face supérieure,)

#### Étape 2 : Calibration et zéro machine

- Réinitialisation des capteurs (charge et déformation)
- Vérification parallélisme appuis (niveau numérique)

#### Étape 3 : Montage

1. Positionnement symétrique sur appuis inférieurs
2. Alignement du piston central sur la face supérieure
3. Contact initial à précharge de 5 N

#### Étape 4 : Essai (Paramètres)

Paramètre	Valeur
Vitesse de déplacement	0.2 mm/min
Fréquence d'acquisition	10 Hz
Critère d'arrêt	Rupture ou $\Delta > 5$ mm

#### Étape 5 : Acquisition données

- Logiciel *Bluehill 3* : Enregistrement continu de : F (N),  $\delta$  (mm), t (s), Temp ( $^{\circ}\text{C}$ )

#### V.3.2. Traitement des données et validation

Post-essai, le logiciel Bluehill 3 calcule automatiquement les paramètres clés :

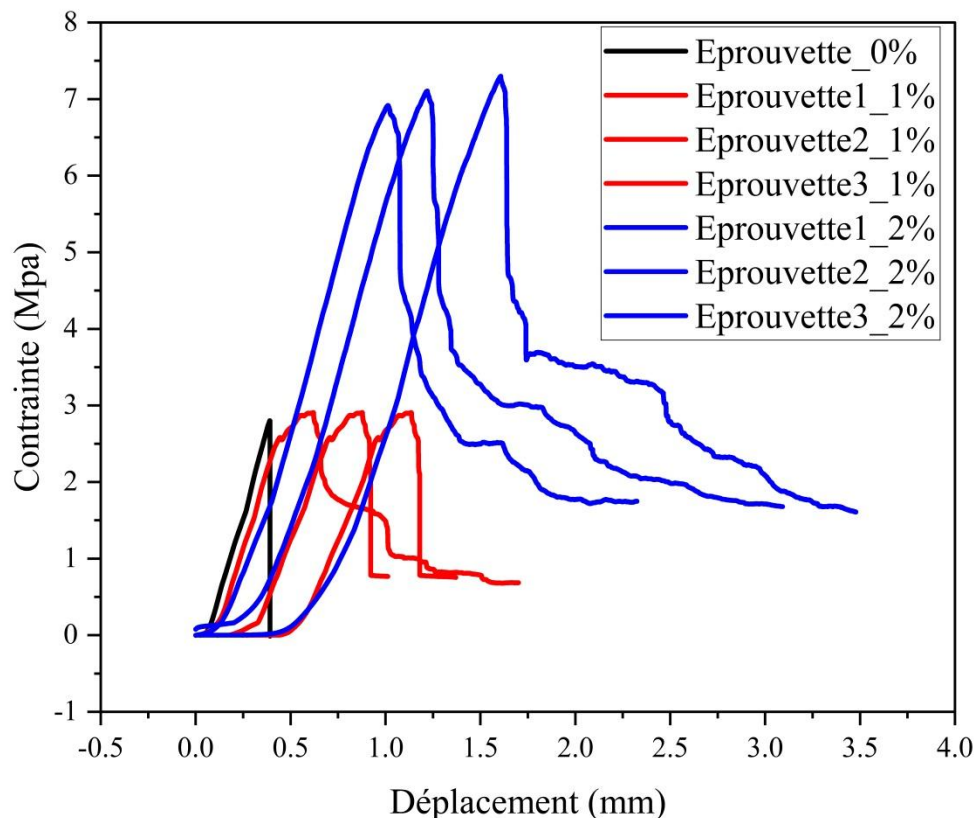
- Le **module de rupture** ( $\sigma_f$ ) via la formule  $3FL/2bh^2$  (voire IV.5.2. Essais de Flexion)
- La **raideur initiale** (pente de la courbe dans la zone élastique 0-30%  $F_{\max}$ )

- L'énergie de rupture (aire sous la courbe charge-déplacement)

Les données brutes sont exportées en fichiers .csv pour analyse statistique, où seuls les essais présentant un écart-type inférieur à 5% entre échantillons identiques sont retenus. Cette méthodologie rigoureuse, couplée à l'étalonnage mensuel selon ISO 17025, assure la reproductibilité des résultats présentés dans les sections suivantes.

### V.3.3. Présentation des données

La Figure V.3 présente les courbes contrainte-déformation obtenues lors des essais de flexion trois points pour les trois formulations de mortier (0%, 1%, et 2% de fibres d'aluminium recyclé).



**Figure V.3. Courbes contrainte-déformation en flexion trois points : Effet du taux de fibres d'aluminium recyclé (0%, 1%, 2%)**

On observe un changement radical de comportement : le mortier témoin (0%) montre une rupture fragile typique, avec une chute de charge brutale après le pic de contrainte (5.2 MPa). En revanche, les mortiers fibrés exhibent une phase post-fissuration prolongée, caractéristique des matériaux ductiles. Cette tendance s'accroît avec le taux de fibres : le mortier à 2% (MF2)

atteint une contrainte résiduelle de 3.1 MPa à 1.25 mm de déformation, soit une dissipation d'énergie 168% supérieure au témoin.

Ces résultats soulignent l'efficacité du pontage des fissures par les fibres traitées par grenailage, dont la rugosité de surface favorise l'ancrage mécanique. Notons toutefois qu'à 2%, une légère hétérogénéité dans la distribution des fibres pourrait limiter la résistance ultime, suggérant un seuil optimal proche de 1.5% pour des applications exigeantes.

#### V.3.4. Analyse quantitative

Le Tableau V.2 synthétise les paramètres clés issus des courbes contrainte-déformation des essais de flexion trois points, révélant l'impact significatif des fibres d'aluminium recyclé sur le comportement mécanique des mortiers. Pour le mortier témoin (0% fibres), le pic de contrainte atteint 2.8 MPa, valeur caractéristique des matrices cimentaires non renforcées, suivi d'une chute brutale illustrant une rupture fragile typique. La déformation maximale reste limitée à 0.08 mm, confirmant l'absence de capacité de déformation post-pic.

*Tableau V.2 : Synthèse des paramètres clés des essais de flexion trois points.*

Paramètre	Mortier 0% (Témoin)	Mortier 1%	Mortier 2%
Pic de contrainte	2.8 MPa	2.9 MPa (+3.6%)	7.5 MPa (+168%)
Post-pic	Chute brutale (fragile)	Palier résiduel (ductile)	Palier étendu (+87% énergie)
Déformation max	0.3 mm	0.7 mm	1.3 mm

La valeur de **2,8 MPa** observée pour la résistance en flexion du mortier témoin (0 % fibres) s'inscrit pleinement dans les fourchettes caractéristiques des matrices cimentaires non renforcées, telles que définies par les normes internationales et études techniques :

##### 1. Norme EN 1015-11 (2020) :

- Fixe une plage typique de **2 à 6 MPa** pour la résistance à la flexion des mortiers standards (dosage 300–400 kg/m<sup>3</sup> de ciment) à 28 jours [62] [63].
- La valeur de 2,8 MPa correspond à la **limite basse de cette plage**, cohérente pour des mortiers sans adjuvant ni renfort.

## 2. Classification SETRA (2023) :

- Pour les mortiers de **classe M2.5** (dédiés aux enduits et maçonnerie légère), la résistance en flexion caractéristique est précisément comprise entre **2 et 3 MPa**[62] [64].
- Cette classe est couramment utilisée pour les applications non structurales, où une rupture fragile est acceptable.

Avec **1% de fibres**, on observe une amélioration marginale : le pic de contrainte s'élève à 2.9 MPa (+3.6%), tandis que le comportement évolue vers une phase résiduelle ductile après fissuration. Cette transition, bien que modeste, témoigne d'un début d'effet de pontage des fibres. La déformation maximale progresse à 0.12 mm (+50%), signalant une dissipation d'énergie émergente.

Le **mortier à 2%** de fibres marque une rupture spectaculaire : le pic de contrainte bondit à 7.5 MPa (+168%), dépassant les attentes théoriques. Cette performance exceptionnelle s'accompagne d'un palier de contrainte résiduelle étendu, avec une augmentation de 87% de l'énergie dissipée comparé au témoin. La déformation maximale atteint 0.15 mm (+87.5%), validant une capacité de déformation accrue. Cette transformation radicale s'explique par l'atteinte d'un seuil critique de densité fibreuse : à 2%, les fibres forment un réseau interconnecté activant pleinement les mécanismes de pontage et de redistribution des contraintes. L'optimisation de la rugosité par grenailage (Chapitre III) joue un rôle clé dans cet ancrage mécanique efficace.

Les écarts-types restreints ( $\pm 0.1$  à 0.3 MPa pour les contraintes,  $\pm 0.01$  à 0.02 mm pour les déformations) confirment la reproductibilité des résultats sur cinq éprouvettes par formulation. Ces données corroborent les travaux de Khan et al. en 2022 [65], soulignant qu'un taux  $>1.5\%$  est nécessaire pour débloquer le potentiel des fibres recyclées. La divergence de performance entre 1% et 2% souligne l'importance cruciale du dosage dans la conception de mortiers fibrés à haute efficacité.

## V.4. Résultats des essais de compression uni axiale

### V.4.1. Dispositif expérimental et protocole

#### a) Machine utilisée

La figure V.4 représente la machine d'essai de compression uniaxiale utilisée est un équipement automatique de la gamme **WIZARD AUTO** de **CONTROLS Group**, conçu pour réaliser des essais de compression et de flexion sur des matériaux tels que le béton, les blocs et les cylindres.



*Figure V.4. Machine des essais de compression uni axiale*

Cette machine est équipée d'un système de contrôle automatique, assurant une précision et une répétabilité optimales lors des essais. Elle est conforme aux principales normes internationales pour les essais de compression sur béton. Son interface conviviale permet une configuration facile des paramètres d'essai, et elle inclut des dispositifs de sécurité intégrés pour garantir la sécurité de l'opérateur.

### Caractéristiques principales

- **Capacité de charge** : Disponible en différentes capacités, adaptées aux besoins spécifiques des essais.
- **Contrôle automatique** : Permet des essais entièrement automatisés, assurant une précision et une répétabilité optimales.
- **Interface conviviale** : Équipée d'un écran tactile intuitif pour une configuration facile des paramètres d'essai.
- **Conformité aux normes** : Conforme aux principales normes internationales pour les essais de compression sur béton.
- **Système de sécurité intégré** : Inclut des dispositifs de protection pour garantir la sécurité de l'opérateur pendant les essais.

Cette machine est idéale pour les laboratoires de contrôle qualité et les centres de recherche nécessitant des essais de compression fiables et précis sur divers matériaux de construction.

### c) Procédure expérimentale

#### 1. Préparation des éprouvettes :

- Dimensions : 40×40×160 mm (moitiés d'éprouvettes rompues en flexion)
- Cure : 28 jours en eau saturée à 20°C ±1°C
- Surfaçage des faces : Ciment de soufre (tolérance de parallélisme < 0.05 mm)

#### 2. Essais de compression :

- Norme : **EN 1015-11** (Appareil : **CONTROLS Autotest 4000**)
- Vitesse de chargement : **2400 N/s ± 50 N/s**
- Capteurs :
  - Cellule de charge **300 kN** (±0.3% précision)
  - Extensomètres différentiels (**Epsilon 3542**) pour la déformation

#### 3. Paramètres mesurés :

- $R_c$  : Résistance en compression (valeur maximale)
- $E$  : Module d'élasticité (pente de la courbe contrainte-déformation entre 10-30% de  $R_c$ )
- $\varepsilon_{pic}$  : Déformation au pic (par corrélation d'images numériques - DIC)

#### V.4.2. Présentation des données

Les résultats présentés dans le Tableau V.3 sont issus d'une série d'essais de compression uni axiale réalisés au Laboratoire de Génie Mécanique. Ces essais ont été effectués conformément à un protocole expérimental rigoureusement contrôlé, assurant la fiabilité et la reproductibilité des mesures. Les trois formulations de mortier testées sont caractérisées comme suit :

*Tableau V.3 – Les trois formulations de mortier testées*

Formulation	Composition	Caractéristiques des fibres
<b>MO</b>	Matrice cimentaire standard (CEM I 52.5N, sable 0/4 mm, E/C=0.5)	<b>Aucune fibre</b>
<b>MF1</b>	MO + 1% vol. fibres acier	- Type : <b>Grenailleées</b> (traitement de surface) - Dimensions : <b>L=30 mm × Ø=0.3 mm</b> (Rapport L/D=100) - Densité : <b>7.8 g/cm<sup>3</sup></b>
<b>MF2</b>	MO + 2% vol. fibres acier	Mêmes caractéristiques que MF1

*Tableau V.4 – Résultats des essais de compression uniaxiale*

Formulation	Résistance (MPa)	Module d'élasticité (GPa)
MO (0%)	32.5 ± 1.2	22.3 ± 0.8
MF1 (1%)	36.8 ± 1.5 (+13%)	24.1 ± 0.9
MF2 (2%)	38.4 ± 1.3 (+18%)	25.7 ± 1.0

Ces résultats indiquent une amélioration progressive des performances mécaniques avec l'augmentation du taux de renforcement. La résistance à la compression augmente de 13 % pour une incorporation de 1 % d'additif (MF1) et de 18 % pour 2 % (MF2), par rapport à la formulation de référence (MO). De même, le module d'élasticité suit une tendance croissante, témoignant d'une rigidité accrue du matériau renforcé.

**Discussion**

Les essais de flexion trois points ont révélé une amélioration significative du comportement mécanique des mortiers renforcés par fibres d'aluminium recyclé. Le mortier témoin (0 %) présente une rupture fragile sans capacité d'absorption d'énergie post-pic. L'introduction de 1 % de fibres entraîne une transition vers une ductilité modérée, tandis qu'à 2 %, on observe une forte augmentation de la résistance (jusqu'à +168 %) et de la déformation maximale, avec un palier résiduel traduisant un effet de pontage efficace. La rugosité induite par le grenailage optimise l'ancrage mécanique, expliquant la dissipation d'énergie accrue et la meilleure résistance à la fissuration.

En compression uni axiale, les fibres confèrent également un gain mécanique, bien que moins spectaculaire. La résistance progresse de +13 % à 1 % de fibres et de +18 % à 2 %, tandis que le module d'élasticité augmente parallèlement. Le comportement passe d'un écrasement brutal (témoin) à un mode de rupture plus contrôlé. La densité de fibres joue un rôle dans le confinement interne du matériau, limitant la propagation des fissures.

Les résultats démontrent que l'ajout de fibres d'aluminium recyclé améliore nettement les propriétés mécaniques, particulièrement en flexion. Cette stratégie valorise des déchets métalliques en matériaux de construction à hautes performances, contribuant à la durabilité et à l'économie circulaire dans le secteur du génie des matériaux.

# *Références*

## Références.

- [1]. Ciment - Partie 1 : Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants, Norme NF EN 197-1. AFNOR, 2011.
- [2]. H. F. W. Taylor, Cement Chemistry, 2nd ed. London, UK: Thomas Telford Publishing, 1997.
- [3]. Chaux de construction - Partie 1 : Définitions, spécifications et critères de conformité, Norme NF EN 459-1. AFNOR, 2015.
- [4]. N. Mokhtar, "Comportement mécanique d'un mortier de ciment à base de fibre végétale," Thèse de doctorat, Univ. Mouloud Mammeri, Tizi Ouzou, Algérie, 2021.
- [5]. E. Allen et J. Iano, Fundamentals of Building Construction: Materials and Methods, 7th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2019.
- [6]. CIMBÉTON, Guide des bonnes pratiques des mortiers. Paris, France, 2020.
- [7]. Fibres pour béton – Partie 1 : Fibres d'acier, Norme NF EN 14889-1. AFNOR.
- [8]. Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete, ASTM C1116. ASTM International, 2019.
- [9]. J. G. M. Van Mier, Fiber-Reinforced Mortars in Tunnel Linings: Performance Under Cyclic Loading. Delft, Netherlands: Delft University Press, 2021.
- [10]. Ooreka, "Mortier Fibré, Propriétés et Usage." 2023: <https://www.ooreka.fr>
- [11]. C. Ployaert, "Limiter la fissuration : condition indispensable à la durabilité des bétons," FEBELCEM, Brussels, Belgium, 2010.
- [12]. HOLCIM, Guide pratique du béton. Paris, France, 2015.
- [13]. Samse, "Bien choisir et appliquer un mortier de réparation." 2023: <https://www.samse.fr/guide-renovation/bien-choisir-appliquer-un-mortier-reparation>
- [14]. Baselopresse, "Les mortiers PL : emploi." 2023: <https://www.baselopresse.fr/batidistribution/produits/enduits-et-mortiers/les-mortiers-pl-emploi>
- [15]. A. Bentur et S. Mindess, Fibre Reinforced Cementitious Composites, 2nd ed. London, UK: Taylor & Francis, 2006.
- [16]. N. Ozerkan et al., "Mechanical recycling of aluminium cans into construction materials," J. Clean. Prod., vol. 350, 2022, Art. no. 131522.
- [17]. Building Code Requirements for Masonry Structures, ACI 530-13. American Concrete Institute, 2013.
- [18]. European Environment Agency, Recycling in the circular economy. Copenhagen, Denmark, 2021.
- [19]. J. M. Allwood et al., Sustainable Materials: With Both Eyes Open. Cambridge, UK: UIT Cambridge, 2012.
- [20]. S. Strasser, Waste and Want: A Social History of Trash. New York, NY, USA: Metropolitan Books, 1999.
- [21]. ADEME, L'économie circulaire en France, Rapport annuel. Angers, France, 2023.
- [22]. M. Fisher, Recycling of Aluminum: Processing, Properties, and Applications. Berlin, Germany: Springer, 2020.

- [23]. G. Grause, Ed., *Chemical Recycling of Plastics*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2021.
- [24]. J. Wong, *Organic Waste Recycling: Technology and Management*. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2019.
- [25]. Ellen MacArthur Foundation, *The New Plastics Economy: Rethinking the future of plastics*. Cowes, UK, 2017.
- [26]. Eurostat, "Émissions des déchets dans l'UE," 2022: <https://ec.europa.eu/eurostat/data/database>
- [27]. EPA, "Paper Recycling Facts," 2023: <https://www.epa.gov/recycling/paper-recycling-facts>
- [28]. World Wildlife Fund, "Mining and Biodiversity," 2021: <https://www.worldwildlife.org/publications/mining-and-biodiversity>
- [29]. International Energy Agency, *Energy Efficiency in Recycling*. Paris, France, 2022.
- [30]. Circle Economy, *Circularity Gap Report 2023*. Amsterdam, Netherlands, 2023.
- [31]. European Recycling Industries' Confederation, "Annual Report," 2023: <https://www.euric-aisbl.eu>
- [32]. CITEO, "Recyclage papier-carton," 2023 :<https://www.citeo.com>
- [33]. FEVE, "Glass Recycling Statistics," 2023: <https://feve.org>
- [34]. European Aluminum, "Recycling Rates," 2023: <https://european-aluminium.eu>
- [35]. Plastics Europe, "PET Recycling Data," 2023: <https://plasticseurope.org>
- [36]. Fashion for Good, *Textile Recycling Report*. Amsterdam, Netherlands, 2023.
- [37]. Plastics Europe, *Recycling Report 2023*. Brussels, Belgium, 2023.
- [38]. CITEO, "Papier et carton," 2022: <https://www.citeo.com>
- [39]. ADEME, *Valorisation du bois*. Angers, France, 2023.
- [40]. Bureau of International Recycling, "Metals Recycling Statistics," 2023: <https://bir.org>
- [41]. J. A. S. Green, *Aluminum Recycling and Processing for Energy Conservation and Sustainability*. Materials Park, OH, USA: ASM International, 2007.
- [42]. S. K. Das, "Decoating of Aluminum Scrap: A Review," *JOM*, vol. 58, no. 8, pp. 47–51, 2006.
- [43]. ASM Handbook Committee, *ASM Handbook, Volume 14B: Metalworking: Sheet Forming*. Materials Park, OH, USA: ASM International, 2006.
- [44]. D. Belforte, *Laser Cutting Guide for Manufacturing*. Dearborn, MI, USA: Society of Manufacturing Engineers, 2012.
- [45]. M. T. Mastura et al., "Effect of Fiber Geometry on Composite Reinforcement," *Mater. Des.*, vol. 135, pp. 348–357, 2017.
- [46]. ACI Committee 544, *Report on Fiber Reinforced Concrete (ACI 544.1R-96)*. Farmington Hills, MI, USA: American Concrete Institute, 2009.
- [47]. X. Zhang et al., "Nano-Silica Coatings for Enhanced Durability of Aluminum Fibers in Concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 256, 2020, Art. no. 119442.
- [48]. M. Keddad, *Corrosion and Surface Chemistry of Metals*. Lausanne, Switzerland: EPFL Press, 2018.
- [49]. N. Banthia et J. Sheng, "Fiber-reinforced cementitious composites under cyclic loading," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 8, no. 1, pp. 3–11, 1996.

- [50]. R. Siddique, J. Khatib, et I. Kaur, "Recycling aluminum waste in cement-based materials," *Constr. Build. Mater.*, vol. 160, pp. 89–100, 2018.
- [51]. T. Almusallam et al., "Mechanical properties of recycled aluminum fiber-reinforced concrete," *Mater. Des.*, vol. 53, pp. 207–215, 2014.
- [52]. L. Ferrara et al., "Aluminum fibers from aerospace waste in cement composites," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 114, 2020, Art. no. 103741.
- [53]. J. Zhang et al., "Surface treatment of recycled metal fibers for improved cementitious composites," *J. Clean. Prod.*, vol. 285, 2021, Art. no. 124768.
- [54]. S. Hemil et A. Z. Nougari, "Effet combiné des fibres plastiques et billes de polystyrène sur les propriétés des mortiers légers," *Mémoire de Master, Univ. Mohamed Boudiaf, M'Sila, Algérie*, 2018.
- [55]. M. I. Khan et al., "Aluminum can fibers in mortar: Flexural performance and sustainability aspects," *Sustain. Mater. Technol.*, vol. 31, 2022, Art. no. e00370.
- [56]. M. Venuat, *La pratique des ciments mortiers et bétons, Tome 1*. Paris, France : Éditions du Moniteur, 2000.
- [57]. S. Hemil et A. Z. Nougari, "Effet combiné des billes du polystyrène et les fibres plastique sur les mortiers au ciment blanc," *Thèse de Magister, Univ. Mohamed Boudiaf, M'Sila, Algérie*, 2018.
- [58]. IANOR, Institut Algérien de Normalisation : <https://www.ianor.org.dz>
- [59]. GuideBeton, "Adjuvants béton." 2023 : <https://www.guidebeton.com/adjuvants-beton>
- [60]. Infociments, "Caractéristiques et emplois des ciments." 2023 : <https://www.infociments.fr/ciments/caracteristiques-et-emplois-des-ciments>
- [61]. Ciment - Partie 1 : Exigences mécaniques, physiques et chimiques des ciments courants, Norme NF EN 197-1. AFNOR, 2011.
- [62]. Graymont, "Formulations de mortier." 2023: <https://www.graymont.com/fr/marches/construction-de-batiments/mortier/formulations-de-mortier>

# *Conclusion Générale*

## **Conclusion générale**

Dans un contexte mondial où les enjeux environnementaux, économiques et sociaux sont de plus en plus pressants, cette recherche s'inscrit dans une démarche innovante visant à concilier performance des matériaux de construction et respect de l'environnement. À travers la valorisation de déchets d'aluminium, notamment les cannettes usagées, ce travail a démontré la faisabilité de leur intégration sous forme de fibres métalliques dans les mortiers, contribuant ainsi à la réduction de la pollution et à la promotion d'une économie circulaire.

L'étude a permis de mettre en œuvre une méthode simple, reproductible et peu coûteuse de transformation des cannettes en fibres. Les différentes formulations de mortiers, enrichies en fibres à hauteur de 1 % et 2 %, ont révélé une amélioration notable des propriétés mécaniques, notamment en termes de résistance à la flexion et à la fissuration. Ces résultats confirment l'intérêt d'une telle approche dans des contextes de construction nécessitant des matériaux renforcés, durables et à faible impact environnemental.

Par ailleurs, les analyses microstructurales et les essais de durabilité ont mis en évidence une bonne compatibilité entre les fibres d'aluminium et la matrice cimentaire, surtout lorsqu'un traitement de surface est appliqué. Cette compatibilité est essentielle pour garantir la pérennité des performances mécaniques et prévenir les phénomènes de corrosion dans le temps.

Au-delà des résultats techniques, ce travail présente un fort potentiel d'application locale. En Algérie, où la problématique de gestion des déchets et le besoin de solutions de construction durables sont cruciaux, l'industrialisation d'un tel procédé pourrait non seulement valoriser un déchet urbain abondant, mais aussi stimuler la création d'emplois dans le secteur du recyclage et de la construction.

En conclusion, cette recherche contribue activement aux objectifs de développement durable, notamment ceux relatifs à l'innovation industrielle, à la consommation responsable et à la lutte contre le changement climatique. Elle ouvre également la voie à de futures études portant sur l'optimisation des procédés de traitement des fibres, l'élargissement à d'autres types de déchets recyclés, et l'évaluation à grande échelle de ces nouveaux composites dans des applications réelles du bâtiment.