

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



THESE

Présentée pour l'obtention du **grade de DOCTORAT 3^{ème} Cycle**

En : Génie Civil

Spécialité : Structure

Par : CHAREF Meryem

Sujet

**ANALYSE NUMÉRIQUE DU COMPORTEMENT À LA RUPTURE DES
BÉTONS À BASE DE DÉCHETS RECYCLÉS**

Soutenue publiquement, le 11/03/2025

devant le jury composé de :

M Abdellatif MEGNOUNIF

Professeur

Univ. Tlemcen

Président

M Nabil KAZI TANI

Professeur

ESSAT

Directeur de Thèse

Mme Zahira BENADLA

Professeur

Univ. Tlemcen

Examinatrice

M Ahmed Soufiane BENOSMAN

Professeur

ESSAT

Examinateur

M Hasan DILBAS

Professeur

Univ. Van Turquie

Invité

Je dédie ce travail à la mémoire de mon cher père et de ma chère mère, dont les souvenirs et les valeurs continuent de guider mes pas.

À mon mari, pour son soutien indéfectible et sa patience tout au long de ce parcours.

À ma famille, pour leur encouragement constant et leur précieuse présence.

Remerciements

Je rends grâce à ALLAH le tout-Puissant pour m'avoir accordé la santé, la patience et la force nécessaires à l'accomplissement de ce travail

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à **M. le Professeur MEGNOUNIF Abdellatif**, président du jury, pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de présider cette soutenance et pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail.

Mes vifs remerciements vont également à **M. le Professeur KAZI TANI Nabil**, le directeur de thèse pour son accompagnement, sa disponibilité et son soutien constant tout au long de cette recherche. Sa rigueur scientifique, ses orientations judicieuses et ses précieux conseils ont été essentiels à la réalisation de cette thèse.

J'exprime ma profonde gratitude à **M. le Professeur DILBAS Hasan**, pour son aide inestimable, son encadrement attentif et sa grande implication tout au long de ce travail. Ses conseils pertinents, sa bienveillance et son soutien constant ont été essentiels à la concrétisation de cette recherche.

Je tiens à adresser mes remerciements les plus sincères à **M. le Professeur BENOSMAN Ahmed Soufiane**, membre du jury, pour sa disponibilité, ses conseils avisés et ses échanges scientifiques enrichissants

Mes remerciements vont également à **Mme. La Professeure BENADLA Zahira**, membre du jury et directrice du laboratoire **RISAM**, pour l'honneur qu'elle me fait en participant à l'évaluation de ce travail.

Mes remerciements vont également à **M. les Professeurs MATALLAH Mohammed et DERRAS Boumédiène**, pour leur soutien bienveillant.

Je tiens à remercier l'ensemble des membres du **laboratoire RISAM** et les enseignants du département du génie civil de l'Université **Abou Bakr Belkaid – Tlemcen**.

J'exprime aussi ma reconnaissance envers l'Université **Van Yuzuncu Yil, Faculté d'ingénierie en Turquie et l'École Supérieure en sciences appliquées (ESSAT)** pour leur accueil, leurs ressources et les échanges scientifiques fructueux qui ont contribué à l'enrichissement de ce travail.

Louange à Dieu

Résumé

Le secteur du génie civil a connu un développement important au cours des dernières décennies dans divers domaines. Le béton est le matériau principal dans la construction et son utilisation intensive a entraîné un épuisement considérable de matières premières, ce qui a conduit les chercheurs à innover de nouvelles alternatives pour substituer ces matières. Le recyclage constitue une solution économique permettant à la fois de réduire l'exploitation des granulats naturels, de valoriser les différents déchets et de résoudre les problèmes environnementaux et écologiques, en intégrant ces déchets recyclés dans la composition des bétons comme substituants d'agrégats naturels. Dans ce contexte, cette présente recherche se focalise sur les nouvelles tendances d'analyses numériques multi-échelles sur des échantillons fissurés et non fissurés en béton composites à base de déchets recyclés (caoutchouc, polymères et granulats de béton recyclés) et de fibres (verre, acier et basalte) de renforcement. Des outils performants d'analyse éléments finis (EF) tel que, Cast3M et ABAQUS, ont permis de caractériser le comportement à la rupture de ces éprouvettes de bétons composites pour différents types et dosages de granulats recyclés. La modélisation multi-échelles a également fait l'objet de ce travail de thèse par le biais de la méthode de distribution PI (PDM). Les résultats de simulation (EF) ont été calibrés et validés à base de résultats expérimentaux, ce qui confirme la fiabilité de ces modèles numériques permettant la prédiction du comportement à la rupture de ces nouvelles générations de composites cimentaires. Ce travail est conclu par des études paramétriques visant à estimer le comportement mécanique à la rupture des bétons géopolymères renforcés par différents types de fibres.

Mots clés : Bétons composites ; Granulats recyclés ; Entaille/Fissure ; Méthode de distribution Pi ; Modélisation multi-échelle ; Charge-Déplacement ; Charge-CMOD.

Abstract

The civil engineering sector has experienced significant development in various areas over the last few decades. Concrete is a main material used in construction, and its widespread use has led to a considerable depletion of raw materials, prompting researchers to innovate new alternatives to replace these materials. Recycling is an economical solution that allows both the reduction of natural aggregate exploitation and the valorization of various waste, while solving environmental and ecological problems by integrating these recycled wastes into the composition of concrete as substitutes for natural aggregates. In this context, this present research focuses on the new trends in multi-scale numerical analyses on cracked and non-cracked samples of composite concrete based on recycled waste (rubber, geopolymers, and recycled concrete aggregates) and reinforcing fibres (glass, steel, and basalt). Finite element analysis tools such as Cast3M and ABAQUS were used to characterize the fracture behavior of these composite concrete specimens for different types and dosages of recycled aggregates. Multi-scale modeling was also the subject of this thesis work using the PI distribution method (PDM). The simulation (FE) results were calibrated and validated based on experimental results, which confirms the reliability of these numerical models allowing the prediction of the fracture behavior of these new generations of cementitious composites. This work is concluded by parametric studies aimed at estimating the mechanical fracture behavior of geopolymer concretes reinforced with different types of fibers.

Keywords : Composite concrete; Recycled aggregates; Notch/crack; Pi distribution method; Multiscale modeling; Load-Displacement; Load-CMOD.

ملخص

شهد قطاع الهندسة المدنية تطوراً ملحوظاً في العقود الأخيرة في مختلف المجالات. تُعدّ الخرسانة المادة الرئيسية في البناء، وقد أدى استخدامها المكثف إلى استنزاف كبير للمواد الخام، مما دفع الباحثين إلى ابتكار بدائل جديدة لتحل محلها. تُعدّ إعادة التدوير حلاً اقتصادياً يُتيح تقليل استغلال الركام الطبيعي، وتثمين النفايات المختلفة، وحل المشكلات البيئية والإيكولوجية، من خلال دمج هذه النفايات المُعاد تدويرها في تركيب الخرسانة كبدايل للركام الطبيعي. في هذا السياق، يُركز هذا البحث على الاتجاهات الجديدة في التحليلات العددية متعددة المقاييس على عينات الخرسانة المُركبة المُتشققة وغير المُتشققة، بالاعتماد على النفايات المُعاد تدويرها (المطاط، والجيوبوليمرات، وركام الخرسانة المُعاد تدويرها) وألياف التسليح (الزجاج، الفولاذ، والبازلت). استُخدمت طرق تحليل العناصر المتناهية (FE) الفعالة، مثل Cast3M و ABAQUS، لتوصيف سلوك الكسر في عينات الخرسانة المُركبة هذه لأنواع وجرعات مُختلفة من الركام المُعاد تدويره. تناولت هذه الرسالة أيضاً النمذجة متعددة المقاييس باستخدام طريقة توزيع (PDM) (PI). وقد تمت معايرة نتائج محاكاة العناصر المتناهية والتحقق من نجاعتها بناءً على النتائج التجريبية، مما يؤكد موثوقية هذه النماذج العددية للتنبؤ بسلوك الكسر لهذه الأجيال الجديدة من المركبات الأسمنتية. ويختتم هذا العمل بدراسات بارامترية تهدف إلى تقدير السلوك الميكانيكي للكسر في خرسانة الجيوبوليمر المسلحة بأنواع مختلفة من الألياف.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة المركبة؛ النفايات المُعاد تدويرها؛ الشق/التصدع؛ طريقة توزيع (PI)؛ متعدد المقاييس؛

الحمل والإزاحة؛ الحمل-CMOD.

Table des matières

INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
PROBLÉMATIQUE.....	3
Objectifs de la recherche.....	4
Plan de la thèse.....	5
Chapitre I.....	6
Propriétés Physico-Mécaniques des Déchets Recyclés.....	6
I. 1 Introduction.....	6
I. 2 Les déchets issus des activités industrielles.....	8
I.2.1 Déchets de l'industrie céramique.....	9
I.2.2 Déchets de plastique.....	11
I.2.3 Déchets pneumatiques et caoutchouc.....	14
I.2.4 Déchets de verre.....	17
I.2.5 Déchets de basalte.....	19
I. 3 Les déchets végétaux issus des activités agroalimentaires.....	21
I. 4 Les agrégats issus des travaux de constructions et démolitions.....	23
I. 5 Conclusion.....	27
Chapitre II.....	28
Valorisation des Déchets dans les Bétons.....	28
II. 1 Introduction.....	28
II. 2 Réglementations internationales de valorisation des déchets dans le secteur de la construction.....	28
II. 3 Recyclage des déchets industriels.....	29
II.3.1 Valorisation des déchets issus de l'industrie céramique.....	29
II.3.2 Valorisation des déchets de plastiques.....	36
II.3.3 Valorisation des déchets de caoutchouc.....	40
II.3.4 Valorisation des déchets de verre.....	46
II.3.5 Valorisation des déchets de basalte.....	49
II. 4 Valorisation des déchets végétaux issus des activités agroalimentaires.....	52
II. 5 Valorisation des déchets de démolition.....	55
II. 6 Conclusion.....	60

Chapitre III.....	62
Synthèse sur les Modèles d'Endommagement des Bétons.....	62
III. 1 Introduction.....	62
III. 2 Effet d'échelle sur la résistance des structures en béton.....	63
III.2.1 Théories de l'effet d'échelle.....	63
III.2.2 Effet d'échelle sur l'énergie de rupture.....	66
III.3 Théories et approches d'endommagement du béton.....	66
III.3.1 Théorie de l'endommagement et de la plasticité.....	68
III.3.2 Théorie de la mécanique de la rupture.....	70
III.3.3 La zone de processus de rupture (FPZ).....	73
III.3.3.1 La modélisation de la FPZ.....	74
III.3.3.2 Évaluation expérimentale de la FPZ.....	78
III.4 Modèles d'endommagement des bétons.....	79
III.4.1 Modèles d'endommagement isotrope de Mazars.....	79
III.4.2 Modèles d'endommagement anisotrope.....	80
III.4.3 Modèles d'endommagement unilatéraux.....	80
III.4.4 Problème de localisation : Techniques de régularisation	80
III.5 Approches numériques adoptées.....	82
III.5.1 Modélisation macroscopique avec Cast3M.....	82
III.5.2 Modélisation macro et méso-échelle avec ABAQUS.....	83
III.5.2.1 Modèle CDP (Concrete Damaged Plasticity) pour le béton.....	84
III.5.2.2 Modélisation de la plasticité des aciers.....	85
III.5.2.3 Méthode PI (π) pour la distribution des granulats.....	85
III.5.2.3.1 Principales méthodes de détermination de π	86
III.5.2.3.2 Application de la méthode PI dans la modélisation numérique.....	87
III.6 Conclusion.....	87
Chapitre IV.....	89
Modélisation Numérique et Validations.....	89
IV. 1 Introduction.....	89
IV. 2 Modélisation macroscopique avec Cast3M.....	89
IV.2.1 Méthodes expérimentales.....	90
IV.2.2 Maillage éléments finis et conditions aux limites.....	91
IV.2.3 Validation et interprétation des résultats.....	94

IV.2.3.1 Courbe Charges-Déplacement.....	94
IV.2.3.2 Courbe Charges-CMOD.....	97
IV.2.3.3 Effets de la longueur de fissure.....	101
IV.2.4 Synthèse de la validation des résultats.....	102
IV .3 Modélisation Multi-échelle avec ABAQUS.....	104
IV.3.1 Approche macroscopique Vs Mésoscopique.....	104
IV.3.1.1 Méthodes expérimentales.....	104
IV.3.1.2 Maillage éléments finis et conditions aux limites.....	105
IV.3.1.3 Validations et interprétation des résultats.....	107
IV.3.1.4 Synthèse de la validation des résultats.....	110
IV.3.2 Approche mésoscopique avec la méthode de distribution PI (π).....	111
IV.3.2.1 Méthodes expérimentales.....	111
IV.3.2.2 Maillage élément finis et conditions aux limites.....	113
IV.3.2.3 Validation du modèle proposé.....	115
IV.3.2.4 Synthèse de la validation des résultats.....	122
IV.4 Conclusion.....	123
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	125
Perspectives.....	128

Liste des tableaux

Tableau I.1 :	Propriétés physiques des agrégats céramiques grossiers.....	10
Tableau I.2 :	Propriétés physiques des agrégats céramiques grossiers.....	10
Tableau I.3 :	Propriétés physiques des différents agrégats.....	17
Tableau I.4 :	Propriétés physiques des granulats de caoutchouc granulés	17
Tableau I.5:	Propriétés physiques des fibres de verres.....	19
Tableau I.6:	Propriétés physiques des fibres de basalte.....	21
Tableau I.7:	Propriétés physiques des agrégats grossiers normaux et des agrégats grossiers recyclés.....	26
Tableau IV.1:	Propriétés mécaniques de poutres en béton armé (RC).....	112
Tableau IV.2:	Paramètre de plasticité de béton de RA.....	112
Tableau IV.3:	Propriétés mécaniques des matériaux de poutres en béton renforcé de fibres.....	113
Tableau IV.4:	Propriétés mécaniques de la poutre.....	120

Liste des figures

Figure I.1 :	Triage des déchets ménagers et industriels.....	7
Figure I.2 :	Déchets de céramique intégrés dans la construction	9
Figure I.3 :	Différents types de plastiques intégrés dans la production cimentaire	12
Figure I.4 :	Déchets de caoutchouc comme remplacement des agrégats.....	14
Figure I.5 :	Types de verre utilisés dans la construction.....	18
Figure I.6 :	La roche de basalte.....	20
Figure I.7 :	Déchets végétales issus à la production agroalimentaire.....	22
Figure I.8 :	Différents types d'agrégats de béton recyclé comprenant (a) une particule de granit entourée de mortier adhérent, (b) trois particules de granit maintenues ensemble et entourées de mortier, (c) mortier...	25
Figure II.1 :	Résistance à la compression du béton avec divers types de granulats céramiques.....	31
Figure II.2 :	Les valeurs normalisées de résistance à la flexion, de résistance à la compression et de ténacité.....	33
Figure II.3 :	Résistance à la compression et résistance à la flexion du béton avec agrégats céramiques usés.....	33
Figure II.4 :	Comportement du retrait de séchage des agrégats de déchets en céramique de béton (a) : grossier ; b fin.	34
Figure II.5 :	Comportement de retrait autogène du béton avec des agrégats de déchets céramiques.....	35
Figure II.6 :	Perméabilité du béton aux agrégats de déchets conventionnels et céramiques.....	35
Figure II.7 :	Variation de la division et de la résistance à la flexion nette en fonction de la teneur en poudre de PVC	38
Figure II.8 :	Variation du module d'élasticité en fonction de la teneur en poudre de PVC	39
Figure II.9 :	Retrait de séchage des mélanges de béton.....	40

Figure II.10 :	Propriétés du béton frais	41
Figure II.11 :	Résultats du test de résistance à la compression a 28 jours.....	43
Figure II.12 :	Variation de la résistance à la compression a 28 jours en fonction de la taille et du contenu des copeaux de caoutchouc et des copeaux de pneu.....	43
Figure II.13 :	Résultats du test de résistance à la flexion.....	44
Figure II.14 :	Résultats du test de module d'élasticité	45
Figure II.15 :	Retrait de séchage du mortier auto-consolidant caoutchouté à 28 jours selon le rapport eau / poudre.....	46
Figure II.16 :	Résultats d'essai d'affaissement pour différents taux de remplacement de verre.....	47
Figure II.17 :	Résistance à la compression du cube.....	48
Figure II.18 :	Variations du diamètre d'écoulement de l'anneau en J des mélanges de bétons autoplaçants en fonction de la fraction volumique des fibres de basalte.....	50
Figure II.19 :	La résistance à la compression à 7 et 28 jours par rapport à la fraction volumique de fibres de basalte.....	51
Figure II.20 :	Valeurs d'essai d'affaissement pour les échantillons de béton renforcé de fibres de bambou.....	53
Figure II.21 :	Résistances à la compression des mélanges de béton de sable en fonction de la longueur et de la teneur en fibres de jute	54
Figure II.22 :	Densité du béton frais / Ratio d'incorporation des agrégats de béton grossier recyclés.....	56
Figure II.23 :	Résistances à la compression à 28 jours par rapport au taux d'incorporation d'agrégats de béton grossiers recyclés.....	57
Figure II.24 :	Relation entre la résistance à la compression et le pourcentage de teneur en agrégats de béton concassé.....	58
Figure II.25 :	Résistance à la flexion des bétons de granulats recyclés.....	59
Figure III.1 :	Loi d'effet d'échelle énergétique pour des structures quasi-fragiles entaillées	65

Figure III.2 :	Diverses échelles de modélisation du matériau béton, de la structure atomique à la construction à grande échelle.....	67
Figure III.3 :	Les trois modes de rupture.....	71
Figure III.4 :	Le modèle Dugdale pour la plasticité de la pointe de fissure (a) et le modèle proposé de la fissure cohésive en mode I (b).....	76
Figure III.5 :	Évolution de la fissure cohésive en mode I et répartition des contraintes.....	76
Figure III.6 :	Problème de localisation lors d'une utilisation d'un modèle local d'endommagement fragile : champ d'endommagement et réponse macroscopique.....	81
Figure IV.1 :	Maillage élément finis de la poutre entaillé en flexion trois point.....	92
Figure IV.2 :	Géométrie des éprouvettes entaillées.....	92
Figure IV.3 :	Champ de déformation de l'essai de flexion à trois points sur une éprouvette soumise à une charge concentrée au milieu de la portée (a), l'amplitude de déformation (b).....	93
Figure IV.4 :	Champ de contrainte de l'essai de flexion à trois points sur une éprouvette soumise à une charge concentrée au milieu.....	94
Figure IV.5 :	Résultats des simulations numériques et des courbes expérimentales (Hilal, 2016) : charge-déplacement pour copeaux de pneus (a) et le mélange de miettes de caoutchouc (b).....	95
Figure IV.6 :	Déplacement expérimental (Hilal, 2016) et numérique en fonction du rapport de contenu de copeaux de pneus (TC).....	97
Figure IV.7 :	Déplacement expérimental (Hilal, 2016) et numérique en fonction du rapport de contenu de miettes de caoutchouc (MCR).....	97
Figure IV.8 :	Résultats des simulations numériques et courbes expérimentales (Arslan, 2016) : Charge-CMOD pour les fibres de basalte (a) et les fibres de verre (b).....	99
Figure IV.9 :	Courbes expérimentales (Arslan, 2016) et numériques de CMOD en fonction du contenu en fibres de basalte (BF).....	100
Figure IV.10 :	Courbes expérimentales (Arslan, 2016) et numériques de CMOD en fonction du contenu en fibres de verre (GF).....	100

Figure IV.11 :	La charge maximale en fonction de α (a/h) pour le béton avec des déchets de caoutchouc.....	102
Figure IV.12 :	La charge maximale en fonction de α (a/h), pour le béton avec des déchets de fibres de basalte (BF) et de fibres de verre (GF).....	102
Figure IV.13 :	Représentation schématique d'essai de flexion quatre points (en mm)	105
Figure IV.14 :	Interaction entre le béton géopolymère et les fibres de verre.....	106
Figure IV.15 :	Maillage de la poutre et les fibres.....	107
Figure IV.16 :	Interaction entre le béton géopolymère et les fibres de verre (GF)....	107
Figure IV.17 :	Simulations numériques et résultats expérimentaux Charge/Déplacement	109
Figure IV.18 :	Simulations numériques et résultats expérimentaux Charge/Déplacement	110
Figure IV.19 :	Géométrie de l'échantillon de poutre en béton armé.....	112
Figure IV.20 :	Géométrie de la poutre entaillée.....	113
Figure IV.21 :	Conditions aux limites et chargement sur la poutre.....	114
Figure IV.22 :	Distribution de granulats de béton recyclés par la PMD.....	114
Figure IV.23 :	Conditions aux limites et chargement.....	115
Figure IV.24 :	Interaction entre agrégats, fibres et la pâte cimentaire.....	115
Figure IV.25 :	Réponse charge-déplacement d'échantillons de béton armé avec et sans RA.....	116
Figure IV.26 :	Courbes déplacement-temps du béton armé avec et sans RA.....	116
Figure IV.27 :	Répartition des contraintes de Von Mises dans les poutres en béton avec des agrégats naturels.....	117
Figure IV.28 :	Répartition des contraintes de Von Mises dans les poutres en béton avec des agrégats recyclés.....	117
Figure IV.29 :	Réponses charge-déplacement d'échantillons de béton avec RA et RA + Fibres (SF).....	119

Figure IV.30 :	Réponses charge-CMOD des échantillons de béton avec RA et RA + Fibres (SF).....	119
Figure IV.31 :	Courbe déflexion-taille des maillages d'échantillons de béton avec granulats recyclés (RA).....	120
Figure IV.32:	Répartition des contraintes des échantillons de béton avec RA dans la direction x (a) et la direction y (b).....	121
Figure IV.33:	Répartition des contraintes des échantillons de béton avec RA + fibres dans la direction x (a) et la direction y (b).....	121
Figure IV.34:	Modèles de rupture de la poutre en béton armé au stade final de chargement.....	122

Notation Principales

BHP	Béton à haute et à performances
MEB	Microscope électronique à balayage
PET	Polyéthylène téréphtalate
PVC	Polychlorure de vinyle
NA	Agrégat naturel
FPZ	Région de la fissure (Fracture Process Zone)
V	Volume de la structure
σ	Champ de contraintes juste avant la rupture
σ_N	Contrainte nominale
f_t	Résistance nominale à la traction du matériau
f_t'	Résistance à la traction
D	Taille de la structure
L_m	Longueur caractéristique
β	Paramètre de la loi
SEL	Loi d'effet d'échelle (Size Effect Law)
MLER	Mécanique linéaire élastique de la rupture
RILEM	Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux
ϵ_{ij}	Tenseur de contrainte
ϵ_{kl}^p	Tenseur des déformations plastiques
ϵ_{kl}	Tenseur des déformations total
C_{ijkl}^D	Tenseur d'élasticité endommagé
W_p	Énergie potentielle totale
G	Taux de restitution d'énergie
MLEReq	Mécanique Linéaire élastique de la Rupture Équivalente
w	Largeur de la fissure
f_G	Taux de libération d'énergie
f(w)	Fonction d'adoucissement
G_f	Energie de fissuration
MEF	Méthode des éléments finis
RA	Granulats recyclés (Recycled Aggregates)

CDP	Modèle de plasticité du béton endommagé (Concrete Damaged Plasticity)
<i>d</i>	Variation scalaire d'endommagement
<i>D^e</i>	Tenseur de rigidité initial
<i>ε</i>	Déformation totale
<i>ε^p</i>	Déformation plastique
<i>f (σ)</i>	Critère de plasticité
<i>s</i>	Tenseur des contraintes déviatoriques
<i>σ_y</i>	Limite d'élasticité d'acier
EF	Éléments finis
CR	Miettes de caoutchouc (Crumb Rubber)
TC	Copeaux de pneus (Tyre Chips)
MCR	Mélange de miettes de caoutchouc
GF	Fibres de verre (Glass fibers)
BF	Fibres de basalte (Basalt fibers)
L	Longueur de poutre
b	Largueur de poutre
h	Hauteur de poutre
a	Hauteur de l'entaille
CL	Condition au limite
CMOD	Crack Mouth Opening Displacement
<i>α</i>	Rapport longueur de fissure et hauteur de la section
SF	Fibre d'acier (Steel Fibers)
SC	Béton géopolymère fabriqué avec la scorie volcanique
RC	Béton armé (Reinforced Concrete)
FRC	Béton renforcé par fibres (Fiber Reinforced Concrete)
PDM	Méthode de distribution Pi (Pi Distribution Method)
CDP	Modèle de plasticité endommageable du béton (Concrete Damaged Plasticity)
RCA	Granulats de béton recyclé (Reinforced Concrete Aggregates)
ITZ	Zone de transition interfaciale

INTRODUCTION GÉNÉRALE

« La connaissance est en elle-même un pouvoir »

Francis Bacon

Les technologies associées aux matériaux de construction comptent parmi les domaines les plus innovants au monde aujourd'hui. Le béton est le matériau le plus utilisé dans le génie civil en raison de sa disponibilité, de son coût relativement approprié et de ses bonnes performances mécaniques. Cependant, cette utilisation intensive entraîne une consommation importante de ressources naturelles et provoque l'accumulation d'importants déchets de construction et de démolition, ce qui engendre des problèmes écologiques et environnementaux majeurs. Par conséquent, l'utilisation de ces débris et d'autres natures de déchets industriels ou agro-alimentaires, ... etc., et leur intégration dans la production de bétons composites constituent une solution permettant de réduire l'impact environnemental, tout en favorisant le développement de nouvelles générations de matériaux composites durables et résistants.

Nombreuses recherches portent sur l'incorporation de déchets recyclés dans le béton, issus de différentes sources (plastiques, caoutchouc, céramique, verre, fibres végétales, basalte..., etc.). L'addition de ces matériaux affecte d'une manière significative les propriétés du béton à l'état frais et durci. Les résultats montrent que certains types de déchets entraînent une diminution de la résistance mécanique et/ou de la durabilité, tandis que d'autres, tels que les fibres de verres, contribuent à améliorer la ductilité et les performances globales du matériau. Donc, la valorisation et réutilisation de granulats recyclés sont considérées comme une alternative aux agrégats naturels. Cependant, une analyse approfondie (numérique et expérimentale) est toujours recommandée pour étudier l'impact de ces déchets sur les propriétés mécaniques et la fissuration du béton d'une part et d'autre part, sur les aspects écologiques et environnementaux.

Le béton est un matériau granulaire et quasi-fragile, dont la réponse mécanique peut être caractérisée par la fissuration et l'endommagement progressif. La compréhension et la prédiction de son comportement nécessitent des approches de modélisation assez robustes. Les modèles locaux d'endommagement, tels que celui proposé par Mazars, présentent certaines limites, notamment la dépendance de la localisation des fissures par rapport au maillage. Afin de contourner ces plusieurs régularisations, comme les approches non-locales, les termes de

gradient ou le modèle « crack band », ont été proposés pour mieux étudier la propagation de l'endommagement. La modélisation des éléments fissurés en béton s'effectue à différentes échelles (nano, micro, méso, macro), tandis que la modélisation des agrégats, des déchets recyclés ou des fibres est généralement réalisée à l'échelle méso-scopique.

Dans ce cadre, le recours à la modélisation numérique par éléments finis se révèle indispensable. L'utilisation combinée des logiciels **Cast3M** et **ABAQUS** permet d'analyser à la fois le comportement global (**modélisation macroscopique**) et les mécanismes locaux (**modélisation multi-échelles**) des bétons composites à base de granulats recyclés avec ou sans armatures (barres ou fibres). La validation des modèles par des résultats expérimentaux a permis de calibrer les simulations numériques, mettant en évidence l'influence du taux de substitution, de la distribution des granulats et de l'effet des fibres sur la fissuration et la redistribution des contraintes. Ces validations permettront d'ouvrir de larges perspectives aux études complémentaires multi-échelles, plus réalistes de certains types de béton composites à base de déchets recyclés pour la prédiction de leurs comportements mécaniques et à la rupture.

PROBLÉMATIQUE

L'utilisation intensive du béton dans la construction a entraîné une carence de matière première naturelle (sable, clinker, gravier... etc), générant des problèmes environnementaux majeurs. Plusieurs chercheurs ont proposé l'ajout de différents types de déchets recyclés aux formulations de béton, comme alternative aux agrégats naturels. L'utilisation du béton depuis des décennies a permis aussi de bien comprendre son comportement mécanique et à la rupture. Cependant, l'étude du béton à base de déchets recyclés est encore au niveau de la recherche, ce qui pose de nombreuses questions scientifiques concernant ses propriétés et ses performances.

La problématique de cette thèse est concerne principalement la prédiction de manière fiable, le comportement mécanique d'un matériau complexe tel que le béton composite, caractérisé par son hétérogénéité et sa fragilité, en utilisant des méthodes numériques et des modèles d'endommagement optimaux pour simuler la fissuration, la propagation des endommagements ainsi que l'analyse des effets des paramètres de composition (taux de remplacement, nature et distribution des fibres et des agrégats).

Nous étudions également les fiabilités des combinaisons de modèles multi-échelles pour mieux comprendre le comportement de ces matériaux composites et contribuer à leur utilisation dans les ouvrages de génie civil.

Objectifs de la recherche

L'incorporation des débris et des différents types de déchets a pour but, d'une part, l'élimination de quantités importantes de déchets dans le monde, et d'autre part, l'optimisation de l'utilisation des agrégats naturels. Les objectifs principaux de cette thèse sont peuvent être synthétiser comme suit :

- Réaliser une recherche bibliographique approfondie visant à étudier l'influence de l'incorporation de différents types et taux de déchets recyclés (industriels et agro-alimentaires), de granulats recyclés et de fibres de renforcement sur les propriétés du béton, à l'état frais et durci.
- Présenter les approches numériques de modélisation des éléments de béton composite subissant à différents modes d'endommagement en fonction des charges et des sollicitations. La technique adoptée dans cette thèse concerne la distribution des agrégats de déchets recyclés, basée sur la constante PI (π) à l'échelle mésoscopique.
- Effectuer des simulations numériques en utilisant les logiciels à base d'éléments finis, Cast3M et ABAQUS, afin d'exploiter et de comparer les comportements globaux et locaux des bétons à base de déchets recyclés et renforcés par fibres. Valider les simulations numériques par les résultats d'essais expérimentaux issus de la littérature. Réaliser une étude paramétrique afin d'évaluer le comportement des bétons pour divers types et taux de substitutions valorisés.

Plan de la thèse

Ce manuscrit de thèse est structuré en quatre chapitres principaux :

Chapitre 1 : Concerne la présentation du contexte général ainsi que la problématique de valorisation des déchets. Les propriétés physico-mécaniques des principaux déchets recyclés sont détaillées dans ce chapitre.

Chapitre 2 : Ce chapitre englobe l'étude des effets de l'incorporation de divers types de déchets sur les propriétés du béton à l'état frais, les caractéristiques mécaniques et la durabilité.

Chapitre 3 : Ce chapitre contient une synthèse des modèles d'endommagement du béton ainsi que les méthodes de modélisation adoptées avec les logiciels Cast3M et ABAQUS.

Chapitre 4 : Dans ce dernier chapitre, l'implémentation des approches de modélisation numérique adoptées est effectuée sur divers éléments de béton composites fissurés. La validation des résultats de simulation par éléments finis est réalisée pour différents cas d'études multi-échelles (macro et mésoscopique) des éprouvettes de béton composite.

Chapitre I

Propriétés Physico-Mécaniques des Déchets Recyclés

« Le monde ne sera pas détruit par ceux qui font le mal, mais par ceux qui les regardent sans rien faire »

Albert Einstein

I. 1 Introduction

Le secteur de la construction est l'un des secteurs les plus concernés par les enjeux du développement durable et de civilisation. De ce fait, de nombreux efforts sont déployés pour trouver des matériaux de construction durables et économiques. Le béton est le matériau de construction le plus utilisé au monde ; ses qualités et ses performances répondent aux différents besoins en matière d'ouvrage et de génie civil en respectant les exigences de sécurité, d'esthétique et de durabilité. L'utilisation de types de béton innovants tels que le béton à haute et à performances (**BHP**) et le béton autoplaçant peut également accroître la durabilité et la production des bétons en offrant une flexibilité dans la conception des ouvrages et en augmentant les performances du matériau.

De nouvelles générations de bétons composites et mortiers sont découvertes ces dernières décennies. Ces nouvelles générations de composites à base de déchets recyclés ont pour but de conserver les ressources naturelles, la réduction des risques pour la santé liée aux composantes humaines et biotiques, valoriser les déchets, résoudre les problèmes de manque d'agrégats et réduire les risques environnementaux liés à l'extraction d'agrégats et à l'élimination des déchets, ainsi, de réduire le coût de la production des matériaux de constructions.

Les granulats sont l'un des matériaux les plus importants dans la composition des bétons qui contiennent du sable sous forme d'agrégat fin et des graviers de différentes tailles et formes comme étant des agrégats grossiers. Ils jouent également un rôle important dans les propriétés du béton telles que la résistance, la stabilité dimensionnelle et la durabilité. Par contre, la demande de ces matériaux continue d'augmenter en raison d'activités

d'infrastructures rapides dans le monde. L'exploitation des granulats crée maintenant un déséquilibre écologique de plusieurs manières : dommages à la biodiversité des zones environnantes, érosion des côtes et des rivières, pollution de l'eau par la turbidité croissante et la suspension de matières solides, destruction des moyens de subsistance des populations tributaires de la pollution par les poussières, endommageant le paysage et générant des déchets dans les mines et les sites de traitement (De Brito & Saikia, 2013). Ces problèmes peuvent être résolus par une planification et une mise en œuvre appropriées, par exemple, par la réduction de la poussière au cours des étapes de traitement. Ainsi, le problème de manque d'agrégats peut être résolu par l'utilisation des déchets en tant qu'agrégats dans les bétons afin d'atteindre la durabilité dans la production de ces matériaux.

Les déchets créent maintenant d'importants problèmes environnementaux et économiques dans le monde. Par exemple, les bouteilles en verre et en plastique, les déchets de construction et de démolition, les déchets pneumatiques (Figure I.1). La résolution de ce problème écologique a fait l'objet de plusieurs recherches dans divers domaines de technologie.



Figure I.1: Triage des déchets ménagers et industriels

Plusieurs discussions et initiatives ont déjà été prises pour réduire la quantité de déchets produits et leur recyclage ou leur valorisation.

Parmi les avantages qui peuvent être obtenus en recyclant ces déchets dans d'autres processus figurent la réduction de la consommation d'énergie, la résolution des problèmes d'élimination et la réduction des risques associés à la santé humaine et aux facteurs biotiques.

La production de déchets dans le monde a connu une augmentation remarquable par des milliers de tonnes annuellement, ces déchets, peuvent être réutilisés comme combustibles dans des fours à ciment ou dans la préparation de briques, comme matières premières pour le clinker, brique et ciment, additifs minéraux au ciment ou comme matériaux granulaires dans la production de mortier et de béton (De Brito & Saikia, 2013). Bien que de grandes quantités de déchets puissent être consommées lors de la production de clinker et de ciment, cette consommation risque d'être importante si ces déchets sont réutilisés comme agrégats dans les mortiers et les bétons et que cette utilisation peut également réduire le coût de la production de béton.

Une analyse approfondie est recommandée avant d'utiliser les déchets en tant qu'agrégats dans le béton afin de contrôler les propriétés des bétons à travers les propriétés des déchets. Dans la partie qui suit, diverses propriétés de certains déchets utilisés comme granulats dans le béton seront présentées.

I. 2 Les déchets issus des activités industrielles

Selon (De Brito & Saikia, 2013), les déchets peuvent être séparés en deux types : ceux qui résultent directement de l'industrie en tant que sous-produits industriels et ceux qui peuvent être nommés déchets recyclés. Le premier type comprend les cendres de charbon, laitiers issus des industries métallurgiques, les boues industrielles, les déchets d'industries telles que les usines de pâtes et papiers, les résidus miniers, l'alimentation et l'agriculture et le cuir. Le second type comprend différents déchets de plastique, de polymère et de caoutchouc.

Une autre classification peut être réalisée en fonction de la nature chimique des déchets. Certains agrégats de déchets proviennent de la production et de l'utilisation de matières organiques : les déchets de plastique, de polymère, de caoutchouc, de cuir et de certains produits alimentaires sont des déchets organiques. D'autre part, les laitiers industrielles, les déchets miniers, les déchets de l'industrie du charbon.

Les plastiques renforcés de verre et certaines boues industrielles peuvent contenir des matières organiques et inorganiques aussi.

La troisième classification est en fonction du poids des agrégats de déchets. Certains agrégats sont naturellement légers tels que les plastiques, le caoutchouc, les déchets de la

plupart des industries alimentaires et agricoles et les cendres de charbon. Par ailleurs, la plupart des laitiers industriels sont plus lourds que les agrégats conventionnels.

I.2.1 Déchets de l'industrie céramique

Dans le monde entier, des efforts de recherche croissants sont déployés pour exploiter avec succès les déchets céramiques dans l'industrie de la construction. Il existe plusieurs types de déchets générés par l'industrie de la céramique (**Figure I.2**). Les chercheurs ont divisé les déchets de céramique en deux grandes catégories en fonction de la source des matières premières, dans lesquelles les déchets de céramique cuits ont été classés en fonction du processus de production.

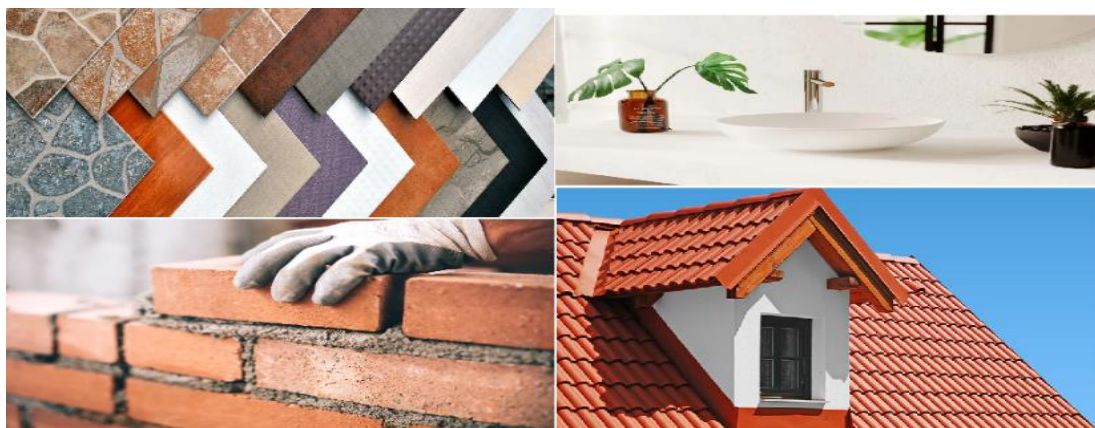


Figure I.2 : Déchets de céramique intégrés dans la construction

L'étude présentée par (**De Brito & Saikia, 2013**) en utilisant des pâtes céramiques rouges et blanches, a conclu que l'utilisation de la pâte blanche est plus fréquente et beaucoup plus volumineuse. Le remplacement des agrégats grossiers traditionnels par des agrégats céramiques influe également et de manière significative sur l'homogénéité des propriétés mécaniques des bétons. Ce phénomène limite les applications de béton à base de granulats de déchets de céramiques uniquement aux éléments de construction caractérisés par des caractéristiques mécaniques moins exigeantes (**Seitl et al., 2017**).

Les déchets de céramique peuvent être utilisés comme remplacement des agrégats fins et grossiers. L'utilisation de déchets céramiques fins et en poudre dans la production de mortier de maçonnerie peut être une alternative économique qui peut aider à augmenter le taux de recyclage des débris de démolition et de construction, soutenant ainsi une croissance durable dans le secteur du bâtiment (**Elemam et al., 2023**). (**De Brito & Saikia, 2013**) ont effectué

plusieurs études sur les déchets de céramiques pour synthétiser les propriétés physiques de cette matière, Ils ont distingué, les essais de (Senthamarai & Manoharan, 2005) qui ont permis de déterminer les propriétés physiques des déchets grossiers ainsi que celles des agrégats naturels (Tableau I.1). Les propriétés des granulats céramiques étaient similaires à celles des granulats naturels de pierre concassée. (Binici, 2007) Ont résumé les diverses propriétés physiques des granulats de déchets avec celles des granulats fins, ces propriétés sont présentées au tableau I.2. Comme pour les propriétés des agrégats grossiers des déchets céramiques, les propriétés des agrégats de déchets fins sont similaires à celles des agrégats conventionnels fins.

Tableau I.1 : Propriétés physiques des agrégats céramiques grossiers (Senthamarai & Manoharan, 2005)

Propriétés	Déchets de céramique	Pierre concassé
Masse volumique	2.45	2.68
Taille maximale (mm)	20	20
Module de finesse	6.88	6.95
Absorption d'eau 24h (%)	0.72	1.20
Masse volumique apparente (kg / m ³)		
En vrac	1200	1350
Compacté	1325	1566
Vides en vrac (%)	50	48
Vides Compacté (%)	45	44
La valeur de concassage (%)	27	24
Valeur d'essai de choc (%)	21	17
Valeur d'abrasion (%)	28	20

Tableau I.2 : Propriétés physiques des agrégats céramiques grossiers (Binici, 2007)

Propriétés	Déchets de céramique	Agrégats fins
Masse volumique	2.44	2.65
Taille maximale (mm)	4	4
Module de finesse	2.68	2.68
Absorption d'eau 24h%	0.71	0.75
Masse volumique apparente (kg / m ³)	1395	1695
Vides (%)	44.20	46.20
Valeur d'abrasion (%)	28	-

La forme des particules d'agrégat en céramique broyé et tamisé, telle qu'observée au microscope électronique, était plus anguleuse que celle du sable naturel. La texture de surface des déchets de céramique observée au microscope électronique à balayage (MEB) s'avère plus rugueuse que celle du sable.

L'étude de **(De Brito et al., 2005)** sur les fragments de briques creuses en céramique a révélé qu'il est nécessaire de pré-saturer les agrégats de céramique et que la quantité d'eau absorbée par ces agrégats doit être mesurée en déduisant le poids total des agrégats juste avant le malaxage.

I.2.2 Déchets de plastique

Le plastique est le déchet le plus abondant, malheureusement, les produits en plastique sont formés à partir de plusieurs éléments chimiques toxiques qui polluent le sol, l'air et l'eau. L'élimination de ces déchets plastiques est considérée comme un problème énorme à cause de sa biodégradabilité faible et de sa décomposition dans les décharges qui peut prendre des centaines d'années.

De nombreuses études ont été réalisées sur l'application de déchets plastiques dans les mélanges de béton, tels que les bouteilles en polyéthylène téréphtalate (**PET**), les tuyaux en polychlorure de vinyle (**PVC**), le polyéthylène haute densité, les plastiques thermodurcissables, les déchets plastiques déchiquetés et recyclés, la mousse de polystyrène expansée, plastique renforcé de fibres de verre, polycarbonate, mousse de polyuréthane, fibre de polypropylène en tant qu'agrégat, fibre et poudre, (**Figure I.3**). En effet, tous les déchets ne conviennent pas à une utilisation dans le béton et ne peuvent pas intégrer avantageusement ses propriétés dans le liant à base de ciment ou dans les agrégats (**Gesoglu et al., 2017**). Il est donc important d'étudier l'effet de ces déchets sur les propriétés des bétons composites produits.

La majorité des agrégats plastiques utilisés dans différentes études provenaient de bouteilles en plastique ou de déchets de conteneurs.

Les déchets plastiques sont ajoutés au béton comme substitut d'agrégats sous forme de particules déchiquetées, obtenues par broyage de conteneurs en plastique à l'aide d'un broyeur. Pour obtenir une taille homogène et faciliter la découpe, seul le corps de la bouteille en plastique est utilisé, à l'exclusion du goulot et du fond (**Azad, 2017a**).

Toutefois, dans certaines études, les déchets plastiques de tailles appropriées sont collectés dans une installation de traitement des déchets plastiques. Dans ce cas, le tamisage dans une gamme de tailles appropriée est effectué au laboratoire. Dans certaines études, le traitement des déchets plastiques est effectué par chauffage, fusion, puis mélange avec d'autres matériaux ou d'autres techniques plus avancées (**De Brito & Saikia, 2013**).

L'une des techniques de recyclage consiste à utiliser des conteneurs en plastique comme substitut d'agrégats, de fibres ou de particules déchetées dans des blocs de béton ou de maçonnerie, le processus de recyclage se déroule correctement, un type spécial de béton ou de blocs structurels légers peut être produit (Azad, 2017b).

Il existe plusieurs méthodes de recyclage et de valorisation de plastique. Dans cette partie, on présente quelques exemples d'utilisation de ces déchets comme agrégats dans les bétons et les mortiers.



Figure I.3 : Différents types de plastiques intégrés dans la production de composites cimentaires

Pour obtenir une taille homogène et faciliter la découpe, seul le corps de la bouteille en plastique est utilisé. Une autre forme d'utilisation consiste à utiliser des granulats comme agrégat plastique grossier, obtenus à partir de certains procédés industriels de chauffage et d'extrusion. Le conteneur de déchets en plastique peut être coupé pour produire différentes tailles de fibres avec différents rapports de forme afin de produire un béton fibreux (**Azad, 2017a**).

(**Akcaozoglu et al., 2010**) ont utilisé comme granulats, des granulés de déchets de bouteilles en PET déchiquetés, fournis par une société commerciale. Les bouteilles ont été collectées en ramassant les déchets de PET, puis en les lavant et en les broyant mécaniquement.

(**Ismail & AL-Hashmi, 2008**) ont étudié le comportement d'un béton contenant des déchets plastiques en forme de fibres, qui représentent les déchets provenant de conteneurs en plastique collectés dans des usines de fabrication de plastique. Il est composé d'environ 80% de polyéthylène et de 20% de polystyrène. Après la collecte de ces déchets plastiques, ils ont été broyés dans une gamme de tailles appropriées.

Dans les travaux de (**Remadania et al., 2009**), les agrégats de PET ont été préparés à partir de bouteilles d'eau potable. À cette fin, les bouteilles en PET ont d'abord été triées, lavées et déchiquetées. Les particules ainsi dérivées ont ensuite été déchiquetées à l'aide d'un broyeur à hélice afin de contrôler la limite granulaire lors du broyage et de faciliter l'adhérence matrice-agrégat en raison de leur forme irrégulière et de leur texture de surface rugueuse.

Les agrégats plastiques peuvent remplacer des particules fines ou grossières, mais les origines de cet agrégat sont complètement différentes de celles des agrégats naturels, c'est-à-dire qu'il y a une différence importante entre les propriétés de chacune. D'après (**De Brito & Saikia, 2013**) le polyéthylène téréphtalate (**PET**) est un polyester thermoplastique avec un module de Young compris entre 1 700 et 2 500 MPa et une résistance à la traction jusqu'à 75 MPa. Il a d'excellentes propriétés de résistance chimique. C'est un polymère semi-cristallin, avec un point de fusion d'environ 260 °C et une température de dégradation initiale d'environ 412 °C. Dans plusieurs références, la masse volumique de l'agrégat de plastique est comprise entre 1,24 et 1,36 g/cm³. Le PET a une très faible conductivité thermique (0,13 à 0,24 W m⁻¹ K⁻¹) par rapport au calcaire (1,26 à 1,33 W m⁻¹ K⁻¹) et au grès (1,7 W m⁻¹ K⁻¹). La capacité thermique spécifique du PET (1,0–1,1 kJ kg⁻¹ K⁻¹) est supérieure à celle du calcaire (0,84 kJ kg⁻¹ K⁻¹) et du grès (0,92 kJ kg⁻¹ K⁻¹).

I.2.3 Déchets pneumatiques et caoutchouc

Le nombre croissant de stocks de pneus mis au rebut dans le monde, et leur nature non dégradables dans des conditions ambiantes, crée d'énormes problèmes environnementaux, y compris des risques d'incendie, cette problématique exige d'exploiter plusieurs façons d'utiliser ces pneus usagés. Par exemple, les réutiliser dans les produits en plastique, à produire de la chaleur et de l'électricité en brûlant des pneus usagés et à les utiliser comme agrégats dans les bétons. Les études sur l'utilisation des pneus usagés en tant qu'agrégats dans les bétons sont actuellement très limitées par rapport aux études sur leur utilisation dans les revêtements d'asphalte (Bideci et al., 2017). Une étude de (Olofinnade & Adeyinka, 2024) a permis d'examiner la pertinence du mélange de pneus usagés avec du ciment dans un sol pour produire des briques de terre comprimées, dans le but de parvenir à un environnement durable.

Des pneus usagés ont été utilisés pour remplacer partiellement les agrégats fins ou grossiers (Figure I.4) dans les mortiers et le béton. Le caoutchouc de pneu peut être utilisé pour produire du béton malléable pour des applications spécifiques, à condition que les processus de sélection soient suffisants pour la mise en œuvre, notamment en termes de quantité, de gradation et de forme des particules (Hilal, 2016).



Figure I.4 : Déchets de caoutchouc comme remplacement des agrégats

Plusieurs études ont été menées sur l'utilisation de caoutchoucs de pneus usagés en tant que granulats de béton. Cependant, il est nécessaire de faire plus de recherches avant de les recommander dans les applications de construction. Dans certaines des études, il est indiqué que l'utilisation de caoutchouc de pneus usagés diminue la durabilité du béton, mais lui permet d'améliorer son élasticité et sa ténacité (**Bideci et al., 2017**).

Le caoutchouc est un matériau qui a une bonne résistance et un poids unitaire assez faible, donc le remplacement des agrégats fins ou grossiers dans le béton par le caoutchouc fournit un béton plus ductile. Ce nouveau béton a une masse volumique faible, une résistance mécanique satisfaisante et une déformabilité améliorée, grâce à ce mécanisme de substitution.

Le béton caoutchouté s'avère être un matériau idéal pour les éléments structurels exposés à surcharges accidentelles et pour lesquels la ténacité et la déformabilité révèlent une importance plus grande que la résistance. À titre d'exemple, les fondations de chaussée et les barrières de pont. Plus précisément, le béton caoutchouté possède des propriétés dynamiques qui amortissent les vibrations et absorbent l'énergie de l'impact de manière plus utile que le béton conventionnel (**Hilal, 2016**).

Dans plusieurs études, les pneus usagés ont été utilisés sous forme de particules de caoutchouc broyées, de copeaux de fibres et aussi comme cendre des pneus dans la confection du béton.

(**Ganjian & al, 2009**) ils ont distingué trois types de caoutchouc selon leur utilisation dans la préparation des bétons.

1. Le caoutchouc déchiqueté ou ébréché est utilisé pour remplacer le gravier. En déchiquetant les morceaux de caoutchouc, des particules d'environ 13 à 76 mm sont produites.

2. Le caoutchouc granulé remplace le sable dans les tailles comprises entre 0,425 et 3,75 mm et est fabriqué à l'aide de broyeurs spéciaux. La taille des particules de caoutchouc dépend du type de broyeur utilisé et de la température générée.

3. Le caoutchouc broyé peut être utilisé aussi comme matériau de remplissage pour remplacer le ciment. Les pneus sont soumis à deux étapes de séparation magnétique et de criblage pour produire cette taille de particules de caoutchouc. Dans le procédé de micro-broyage, les particules de caoutchouc fabriquées sont comprises entre 0,075 et 0,475 mm.

La proportion de caoutchouc dans le béton a généralement été substituée entre 0% et 100% en fonction du volume global, mais après 20% à 25%, on observe une diminution systématique de la résistance à la compression et à la traction axiale du béton. De ce fait, il est nécessaire de limiter le taux de caoutchouc résiduel dans le béton (**Bideci et al., 2017**).

Pour évaluer les propriétés optimales des bétons caoutchoutés, il faut bien connaître la taille, la proportion dans le mélange de béton et la texture de surface des particules de caoutchouc.

Dans les études réalisées, il a été rapporté que les caoutchoucs avec une forme de fibre ont de meilleures performances que ceux avec une forme de puce. Mais il est connu que le rapport longueur / diamètre ne doit pas être très élevé, sinon les caoutchoucs en forme de fibres risquent de s'enrouler lors du mélange (**Bideci et al., 2017**).

(**De Brito & Saikia, 2013**) ont présenté une revue de la littérature sur les propriétés globales du caoutchouc des pneumatiques, on soustraire quelque exemple :

Dans l'étude réalisée par (**Ganjian et al., 2009**), ils ont utilisé deux types de déchets de pneumatiques en remplacement de gros granulats et de ciment dans la préparation du béton. La densité relative de caoutchouc ébréché rapportée par ces auteurs était de 1,3. Ils ont conclu que le béton contenant des agrégats de caoutchouc présentait de très faibles propriétés de résistance par rapport au béton contenant des agrégats naturels, en raison du manque de liaison appropriée entre les agrégats de caoutchouc et la pâte de ciment, et ce par rapport à la matrice cimentaire et aux agrégats naturels.

(**Khaloo et al., 2008**), ont rapporté que lors de l'utilisation de deux types de particules de caoutchouc de pneus usagés en tant que granulats dans la préparation du béton, le caoutchouc usagé était un matériau fin dont la granulométrie était proche de celle du sable et les fragments de pneus grossiers utilisés produits par déchiquetage mécanique.

Les diverses propriétés physiques des granulats de caoutchouc sont présentées dans le **Tableau I.3**. La faible densité et le poids unitaire des granulats de caoutchouc réduisent le poids unitaire du béton, qui est préparé en remplaçant les granulats naturels lourds par des granulats de caoutchouc. En raison de la nature non polaire des particules de caoutchouc et de leur tendance à emprisonner de l'air sur leurs surfaces rugueuses, le béton contenant des granulats de caoutchouc possède une teneur en air supérieure à celle du béton normal. Le

module d'élasticité des granulats de caoutchouc par rapport aux granulats minéraux est très faible et les granulats de caoutchouc agissent donc comme des pores dilatés et ne contribuent pas de manière significative à la résistance aux charges externes appliquées.

Dans une étude similaire, (Sukontasukkul & Chaikaew, 2006) ont rapporté l'utilisation de caoutchouc de pneus ramollis comme substitut partiel d'agrégats pour la production des pavés en béton. Les particules de caoutchouc broyées passant dans les tamis ASTM n° 6 et ASTM n° 20 ont été utilisées séparément en tant qu'agrégats dans le béton. Le poids spécifique et le module de finesse des deux agrégats de caoutchouc granulés sont présentés dans le **Tableau I.4**. Selon les auteurs, l'augmentation des besoins en eau des mélanges contenant du caoutchouc par rapport aux bétons classiques est due à la faible densité et à la grande surface spécifique des miettes de caoutchouc.

Tableau I.3 : Propriétés physiques des différents agrégats (Khaloo et al. 2008)

Type d'agrégats	Densité	Eau-absorbé (%)	Module de finesse	Poids unitaire (Kg / m ³)
Granulat naturel grossier	2.65	2.66	Agrégat naturel	1701.3
Granulats fins naturels	2.67	5.01	4.35	1716.8
Agrégat de caoutchouc de pneu	1.16	49.56	Agrégat naturel	1150

Tableau I.4 : Propriétés physiques des granulats de caoutchouc granulés. (Sukontasukkul & Chaikaew, 2006)

Propriétés	Miette de caoutchouc N. 06	Miette de caoutchouc N. 20
Masse volumique apparente moyenne	0.97	0.88
Masse volumique absolue moyenne	0.98	0.89
Absorption moyenne (%)	1.01	1.70
Module de finesse	4.98	2.62

I.2.4 Déchets de verre

Parmi les fibres les plus utilisées dans la confection des matériaux de construction sont les fibres de verre. Les déchets en verre provenant des ménages qui se composent de bouteilles, de bocaux, de vitrages et de déchets de construction de bâtiments (**Figure I.5**). De grandes quantités de ces déchets ne peuvent pas être éliminées. Cependant, l'impact environnemental peut être réduit en faisant une réutilisation plus durable de ces déchets, c'est ce qu'on appelle la « Hiérarchie des déchets ». Son objectif est de réduire, réutiliser ou recycler les déchets, ce

dernier étant l'option privilégiée d'élimination des déchets (Batayneh et al., 2007). L'incorporation de fibres de verre dans la matrice cimentaire semble être une bonne substitution au béton armé dans la construction d'abris préfabriqués et d'éléments structuraux minces (Loukil et al., 2019).

Le calcin est du verre récupéré à partir de déchets. Il est d'abord classé et nettoyé pour éliminer les impuretés. Ensuite, il est broyé très finement et ensuite introduit avec les matières premières afin de former le lit de fusion. Il peut également être broyé manuellement en laboratoire puis tamisé (Batayneh et al., 2007).

Plusieurs études ont été réalisées pour développer les propriétés des bétons contenant des déchets de verre. (Arslan, 2016) a ajouté des teneurs en fibres de 0,5, 1, 2 et 3 kg/m³ avec une longueur de fibre de 24 mm pour étudier ces effets sur le comportement mécanique et à la rupture du béton composite.



Figure I.5 : Types de verre réutilisés dans la construction

(Loukil et al., 2019) ont formulé un béton renforcé de fibres de verre avec des proportions des mélanges qui ont été préparées en utilisant trois fractions pondérales de fibres de verre 0%, 2% et 3% en utilisant la méthode pré-mélange. Pour atteindre des résistances élevées après 28 jours d'âge sans aucune armature en acier. Dans le même contexte (Batayneh et al., 2007), ils ont remplacé des granulats fins par du verre varié de 0 % à 20 %.

Le tableau I.5 présente les propriétés physiques des fibres de verres étudiées par (Parmar et al., 2021), Ils ont également indiqué que les caractéristiques mécaniques de la fibre de verre sont approximativement équivalentes à celles d'autres fibres telles que les polymères et le carbone. Par conséquent, les fibres de verre sont utilisées pour de nombreux produits polymères en tant qu'agents de renforcement.

Tableau I.5 : Propriétés physiques des fibres de verres (Parmar et al., 2021)

Propriété	Valeurs
Gravité spécifique.	2,68
Module d'élasticité (Gpa)	72
Résistance à la traction (Mpa)	1700
Diamètre (micromètre)	14
Longueur (mm)	12
Nombre de fibres (million/Kg)	235

I.2.5 Déchets de basalte

La fibre de basalte est un nouveau type de fibre inorganique extrudée à partir de roche de basalte fondu (Figure I.6). Le processus de fabrication de ce type de fibre est similaire à celui de la fibre de verre, mais avec moins d'énergie consommée et sans additif, ce qui la rend moins chère que les fibres de verre ou de carbone, (Jiang et al., 2014). Les fibres de basalte sont formées en chauffant des roches de basalte broyées et en canalisant le basalte fondu à travers une filière pour former des filaments de basalte (El-Gelani et al., 2018).

La matière première de la fibre de basalte provient de la roche volcanique naturelle, qui intègre une stabilité chimique et thermique élevée et ne produit aucun résidu de gaz ou de déchets nocifs dans le processus de production de la fibre. C'est une sorte de nouveau matériau vert qui répond aux exigences de protection de l'environnement ; la résistance de la

fibres de basalte est bien supérieure à celle de la fibre naturelle ou de la fibre synthétique, (Zhou et al., 2020). Les fibres de basalte sont un additif industriel moderne pour la fabrication du béton et elles sont fabriquées à faible coût par rapport aux autres fibres (Haido et al., 2020 ; Zhou et al., 2020).



Figure I.6: La roche de basalte

L'utilisation de fibres de basalte hachées dans le béton comme armature est une méthode considérable utilisée pour renforcer et réparer les structures en raison de leurs excellentes propriétés telles que la résistance chimique, la résistance mécanique, la facilité d'application et la légèreté. Cette méthode de renforcement du béton se distingue par son intérêt pratique, sa rapidité d'application et son coût de main-d'œuvre économiquement réduit (Chiadighikaobi, 2019).

Les fibres de basalte peuvent être utilisées de certaines manières pour augmenter les performances mécaniques du béton. Certains chercheurs ont effectué une série d'études sur les performances du béton composite à base de fibres de basalte. Les travaux de recherche de (El-Gelani et al., 2018) ont identifié l'utilisation de deux types de fibres de basalte hachées disponibles dans le commerce avec différents rapports, qui sont le basalte sec (GeoTech

Fibre) et le basalte pré-trempé dans une résine époxy (GeoTech Matrix), dans le mélange béton avec des quantités variables d'additifs de fibres de basalte.

De plus, les auteurs (**Haido et al., 2020**) ont étudié les propriétés du béton autoplaçant frais et durci en tenant compte des quatre fractions volumiques de fibres de basalte de 0 ; 0,25 ; 0,5 et 1 % qui ont été ajoutées au volume total de béton.

Des essais de flexion trois points ont été réalisés par (**Arslan, 2016**) sur des poutres entaillées réalisées en béton fibré de basalte avec des teneurs en fibres de 0,5, 1, 2 et 3 kg/m³ pour déterminer les valeurs de l'énergie de rupture.

Les propriétés de la fibre de basalte utilisée dans l'étude de (**Haido et al., 2020**) sont présentées dans le **tableau I.6**. (**Jiang et al., 2014**) ont mentionné que les fibres de basalte ont un module d'élasticité élevé, une résistance à la température, une bonne résistance aux attaques chimiques, ainsi qu'une excellente résistance au cisaillement interfacial.

Tableau I.6 : Propriétés physiques des fibres de basalte (**Haido et al., 2020**)

Propriétés	Valeurs
Longueur [mm]	24
Diamètre [μm]	16 \pm 2
Densité [g/cm ³]	2,80
Module d'élasticité [G Pa]	89
Température de fusion [°C]	1450

I. 3 Les déchets Végétaux issus des activités agroalimentaires

De nos jours, il existe une préoccupation importante d'environnement et une prise de conscience de la nécessité d'un développement durable et économique, ce qui a conduit à l'utilisation de fibres naturelles comme renforts dans les composites cimentaires. Le besoin d'un matériau léger et performant augmente pour économiser l'énergie dans diverses industries et applications d'ingénierie (**Mosisa et al., 2019**). Les fibres naturelles semblent être une alternative de moindre impact environnemental que les fibres issues de matières fossiles, grâce à leur faible densité, leur faible coût et leurs propriétés spécifiques compétitives. Parmi les fibres végétales se distinguent les fibres provenant des poils séminaux des graines comme le coton ; les fibres libériennes extraites de tiges de plantes comme le lin, le chanvre ou le jute

; et les fibres issues de feuilles comme le sisal et le bambou (**Figure I.7**), de troncs ou d'enveloppes de fruits comme la noix de coco (**HALLONET, 2016 ; Gobi et al., 2021**).



Figure I.7 : Déchets végétaux issus à la production agro-alimentaire

le lin est considéré comme l'un des plus prometteurs pour les composites cimentaires en raison de ses propriétés excellentes (**Shah et al., 2013**). Le lin est une plante annuelle dicotylédone de la famille des Linacées; Afin d'exploiter les fibres contenues dans l'enveloppe extérieure de la tige de lin, il est nécessaire de les extraire par teillage qui est un processus mécanique comprenant les étapes successives de l'égrenage, l'étirage, le broyage et le battage des tiges, lors de ce processus les graines oléagineuses, les fibres longues et les fibres courtes sont séparées du reste de la tige, les fibres destinées à l'industrie textile sont ensuite transformées en fil lors de la filature, qui comprend différentes étapes d'étirage et de torsion (**HALLONET, 2016**). Les fibres ont été prétraitées avec cinq solutions différentes

pendant 1 heure à 95°C ; Après prétraitement, les fibres ont été lavées pendant 10 min à 50°C puis pendant 10 min à température ambiante afin d'éliminer les solvants et extractifs résiduels puis séchées pendant 2h à 105°C, ces techniques ont été présentées par **(Fernández et al., 2014)**. Ces fibres de lin ont été reconnues comme un substitut potentiel aux fibres de verre comme renfort dans les composites époxy pour diverses applications **(Saadati et al., 2020)**.

Le recyclage enzymatique des déchets de jute à l'aide de l'enzyme PULMOZYME a été étudié par **(Mohajershojaei & Dadashian, 2014)**. Ils ont utilisé les déchets de jute des usines de production de tapis fabriqués à la machine. Par contre, dans l'étude de **(Kalaivani et al., 2020)**, la fibre de jute est coupée à une longueur de 10 mm et un diamètre de 0,5 mm, ensuite elle est trempée dans une solution de NaOH pendant environ 24 heures pour éliminer toutes les impuretés, puis séchée pendant environ 24 heures. Il a été observé que le traitement au NaOH réduisait la capacité d'absorption d'eau des fibres. Dans la même étude, ils ont ajouté les fibres de jute dans différentes fractions de volume jusqu'à 1% à un béton composite à base de déchets de plastique. Par ailleurs, **(Guendouz et al., 2025)** ont étudié la possibilité d'utiliser les fibres de jute usagées sans transformation afin de minimiser le coût du matériau obtenu.

Les fibres naturelles de sisal et de bambou sont extraites de la plante de sisal et du bambou par un procédé manuel par rouissage et de mise au rebut de la feuille de la plante de sisal, ensuite un traitement alcalin des fibres de bambou et de sisal est utilisé dans lequel, les fibres sont trempées dans une solution de NaOH pendant quelques heures, puis elles sont retirées puis lavées plusieurs fois à l'eau douce afin de réduire la réactivité avec l'environnement. Enfin, ces fibres ont séché au soleil **(Mosisa & Sirhabizu, 2019)**. Les fibres de bambou et de sisal qui ont été exposées au soleil sont d'abord séparées et hachées. **(Krishna Mohan et al., 2021)** ont étudié l'effet de l'ajout de fibre de bambou et de sisal dans divers pourcentages de poids, sur le comportement mécanique des composites est étudié.

I. 4 Les agrégats issus des travaux de constructions et démolitions

La démolition d'anciennes structures génère un volume énorme de déchets de construction et de démolition. L'utilisation de ces déchets en tant qu'agrégat pour la fabrication du béton est prise en compte dans les nouvelles études de recherche. L'utilisation d'agrégats de déchets de construction et de démolition permet de réduire l'épuisement des agrégats naturels et les

problèmes liés à l'extraction des agrégats, ces déchets peuvent provenir de la construction ou la démolition totale ou partielle des ouvrages et d'infrastructures civiles.

Pour classifier les différents types d'agrégats de déchets de construction et de démolition, la norme **BS 8500 (2002)** définit deux types d'agrégats de déchets de construction et de démolition. L'agrégat de béton contenant au moins 95% de béton concassé est défini comme un agrégat de béton recyclé et 100% d'agrégat à base de maçonnerie concassée est défini comme un agrégat recyclé. Cependant, tous les types de granulats peuvent être considérés comme des granulats de déchets de construction et de démolition (**De Brito & Saikia, 2013**).

Étant donné que les déchets de construction et de démolition contiennent plusieurs contaminants, tels que le bois, les plastiques et le gypse, ces matériaux contaminants doivent être éliminés avant la réutilisation des déchets de démolition en tant qu'agrégat dans le béton. Ces impuretés ont plusieurs effets néfastes et ne conviennent donc pas à la production de béton. Par conséquent, dans la plupart des cas, les impuretés présentes dans les déchets de démolition du béton doivent être séparées au cours du processus (**De Brito & Saikia, 2013**).

Quelle que soit l'origine de ces granulats, le béton est un matériau fragile à faible échelle, donc la connaissance des propriétés du béton à base d'agrégats recyclés est un élément clé pour la prévision de sa durabilité et de son comportement sous les différentes charges.

Dans la littérature, deux types d'agrégats de déchets de construction et de démolition sont rapportés, certains agrégats issus de démolition contiennent des agrégats naturels avec du mortier collé. Ceux-ci sont fabriqués à partir de béton préfabriqué recyclé et d'éprouvettes. Par ailleurs, dans certains granulats de déchets de démolition, plusieurs types de contaminants, tels que les mélanges de bitume, les plastiques, les briques et les carreaux, sont présents en quantités mineures dans les granulats naturels et le mortier collé (**De Brito & Saikia, 2013**).

Les agrégats de béton recyclé sont produits en réduisant la taille des débris de béton au cours de multiples étapes de concassage. En fonction de la taille, la particule de béton concassée peut comprendre une ou plusieurs particules d'agrégats grossiers naturels maintenues entièrement ou partiellement entourées d'une couche de mortier. (**Figure I.8 (a,b)**); (**Akbarnezhad et al., 2011**).

Le processus de production des agrégats de déchets de démolition de construction affecte sa qualité et sa composition, et ces propriétés, donc, une source de béton de meilleure qualité donne des granulats de meilleure qualité.

La densité apparente des agrégats de déchets de construction et de démolition est également inférieure à celle des agrégats normaux. La densité apparente des granulats de déchets de construction et de démolition est généralement comprise entre 1 150 et 1 400 kg/m³, à quelques exceptions près (De Brito & Saikia, 2013). Selon (Ferreira et al., 2011), la densité apparente faible de l'agrégat de déchets de démolition par rapport à l'agrégat naturel est due au plus grand volume de vides entre les particules dans l'agrégat récupéré de la démolition.

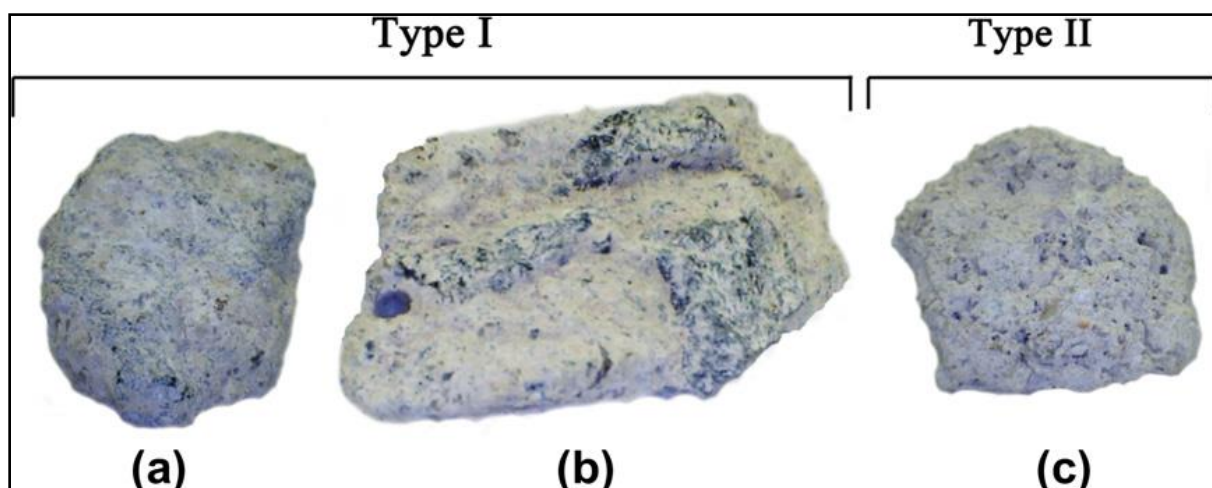


Figure I.8: Différents types d'agrégats de béton recyclé comprenant (a) une particule de granit entourée de mortier adhérent, (b) trois particules de granit maintenues ensemble et entourées de mortier, (c) mortier. (Akbarnezhad et al., 2011)

La capacité d'absorption d'eau des agrégats de déchets de démolition est supérieure à celle des agrégats normaux, car ces agrégats sont composés de pâte de ciment, qui est par nature poreuse et peut donc absorber de grandes quantités d'eau (De Brito & Saikia, 2013).

Dans l'étude de (Minhaj et al., 2018), les auteurs ont comparé les propriétés physiques des agrégats grossiers normaux et des agrégats grossiers recyclés ; ces propriétés sont présentées au **Tableau I.7**. Une absorption d'eau plus élevée et une densité plus faible ont été observées pour l'agrégat grossier recyclé, équivalent à l'agrégat grossier normal.

Tableau I.7 : Propriétés physiques des agrégats grossiers normaux et des agrégats grossiers recyclés (Minhaj et al., 2018)

Catégorie	Masse volumique apparente (kg / m ³)	Densité	Absorption d'eau (%)
Agrégats grossiers normaux	1512	2,53	2,06
Agrégats grossiers recyclés	1413	2,32	7,61

(De Brito & Saikia, 2013) ont présenté une synthèse des propriétés, dont on présente quelques-unes.

Presque toutes les propriétés des agrégats de déchets de construction et de démolition dépendent de la teneur en mortier. Le mortier collé peut être présent sous forme de mottes incrustées dans des proportions variables d'agrégats naturels plus petits ou à la surface de l'agrégat naturel présent dans les agrégats de déchets de démolition pour la construction ou comme liant de deux particules d'agrégats naturels ou plus.

Tous les types de densités ainsi que celles apparentes des agrégats de déchets de démolition de construction sont inférieurs à ceux des agrégats naturels, en raison de la présence de pâte / mortier de ciment poreux et moins dense dans les agrégats de déchets de démolition de construction.

La porosité et la capacité d'absorption d'eau des agrégats de déchets de construction et de démolition sont très élevées par rapport à celles des agrégats naturels. La plus grande capacité d'absorption d'eau des agrégats de démolition dégrade considérablement l'ouvrabilité du béton résultant, ce qui affecte finalement les diverses propriétés du béton obtenu.

En raison de la présence de mortier collé, l'agrégat de déchets de démolition à une valeur d'abrasion inférieure à l'essai de « Los Angeles » par rapport à celle des agrégats naturels, et sa ténacité est également inférieure à celle des granulats naturels.

Les performances de durabilité de la plupart des agrégats de déchets de construction et de démolition sont considérablement plus faibles que celles des agrégats naturels.

I. 5 Conclusion

Les quantités massives de déchets produites chaque année sont considérées comme l'une des principales causes de problèmes écologiques et environnementaux ; dans ce contexte, de nombreux chercheurs ont mené des études sur la valorisation des déchets. Les propriétés physico-mécaniques des déchets recyclés ont été présentées dans ce chapitre. Ces propriétés varient en fonction de la nature et de la provenance des matériaux, chacun de ces matériaux possède plusieurs types de propriétés. Le chapitre suivant se concentre sur l'utilisation des déchets dans la construction, les propriétés du béton composite fabriqué à partir de déchets recyclés à l'état frais et durci, ainsi que le comportement et la durabilité de cette nouvelle génération de matériaux de construction.

Chapitre II

Valorisation des Déchets dans les Bétons

« Nous n'héritons pas de la Terre de nos parents, nous l'empruntons à nos enfants »
Antoine de Saint-Exupéry

II. 1 Introduction

Les granulats représentent la plus grande partie du volume du béton et jouent donc un rôle important dans les propriétés mécaniques des bétons, telles que la maniabilité, la résistance et la durabilité. Récemment, plusieurs déchets ont été étudiés pour être réutilisés comme agrégats dans le béton. L'utilisation de déchets en tant qu'agrégats permettra de valoriser de grandes quantités de ces déchets car il s'agit d'un composant principal pour ces composites cimentaires.

Les propriétés de certains déchets en tant qu'agrégats ont été présentées dans le chapitre 1. Dans ce chapitre, nous examinons les propriétés des bétons selon trois cas de figure : propriétés du béton frais, propriétés mécaniques et durabilité pour le béton durci.

II. 2 Réglementations internationales de valorisation des déchets dans le secteur de la construction

La gestion des déchets autour du monde a connu une transformation importante, certains pays ont établi des normes spécifiques pour contrôler la gestion des déchets dans le domaine de la construction. A titre indicatif :

La loi fédérale allemande de la gestion des débris de construction (Kreislaufwirtschaftsgesetz, KrWG), exige des règles sévères concernant le triage et le recyclage des déchets de construction (**Bundesministerium der Justiz**).

Au Japon, la loi de recyclage des matériaux de construction (loi n° 104 de 2000) précise que le béton, l'asphalte et le bois doivent être triés et recyclés séparément dans les projets de rénovation (**Ministère de l'Environnement du Japon**).

Le CALGreen (California Green Building Standards Code, Titre 24 Partie 11) est appliqué en Californie, spécifiant un minimum taux de recyclage de 50% pour les déchets de démolition, aller jusqu'à 65% selon la loi de l'état (**California Building Standards Commission, 2019**).

En Chine, exactement à Pékin, une loi municipale sur la gestion des déchets solides a été mise en place, y compris les déchets de construction, en 2011 (**Beijing Municipal People's Government, 2020**).

Bien que chaque pays ait ses propres lois, elles visent toutes à réduire l'impact environnemental en encourageant l'utilisation de déchets recyclés dans les matériaux de construction.

II. 3 Recyclage des déchets industriels

Dans cette partie, l'accent sera mis sur le comportement du béton avec divers types de déchets industriels.

II.3.1 Valorisation des déchets issus de l'industrie céramique

- **Propriétés du béton frais**

Les propriétés d'un mélange de béton avec des agrégats de déchets céramiques dépendent de la nature des agrégats. La majorité des agrégats de céramique cités dans la littérature ont des porosités supérieures à celles des agrégats naturels. Par conséquent, leur incorporation dans le mélange de béton diminue l'affaissement, dû à leur grande porosité, à leur texture de surface rugueuse et aussi à leur nature angulaire (**De Brito & Saikia, 2013**).

(**Topçu & Canbaz, 2007**) ont observé des problèmes de maniabilité dus à l'utilisation de déchets de carreaux comme remplacement partiel et total d'agrégats grossiers en raison de la texture de surface rugueuse des agrégats de carreaux.

(**Lopez et al., 2007**) et (**Guerra et al., 2009**) ont observé une maniabilité similaire du béton avec des agrégats de céramique et des bétons naturels, lorsque ces derniers ont été remplacés par différentes quantités d'agrégats de céramique fins et grossiers.

Le béton de granulats grossiers de déchets de céramique frais était plus cohésif et réutilisable que le béton conventionnel. Cela est dû à la faible absorption d'eau et à la texture de surface lisse de l'agrégat grossier de ces déchets de céramique.

D'autre part, les agrégats de céramique ont des propriétés un peu particulières telles qu'une absorption d'eau inférieure à celle d'agrégat naturel (NA) et une texture de surface lisse qui pourrait augmenter l'affaissement du mélange de béton résultant (**Senthamarai & Manoharan, 2005**).

La densité du béton contenant des granulats céramiques usagés est généralement inférieure (ou similaire) à celle du béton conventionnel (**De Brito & Saikia, 2013**). (**Binici, 2007**) a conclu que la densité et la teneur en air sont similaires pour ce béton conventionnel et les mélanges de béton préparés en remplaçant 40, 50 et 60% en poids de sable par un agrégat de céramique. (**Torkittikul & Chaipanich, 2010**) ont observé une tendance à la baisse de la densité des mélanges de béton frais et de mortier de ciment en raison de l'utilisation d'agrégats de céramique substituant le sable.

(**De Brito et al., 2005**) ont rapporté que la densité du béton diminuait à mesure que le taux de remplacement des agrégats de calcaire par des agrégats de céramique de taille similaire augmentait, en raison de la densité inférieure des agrégats de céramique par rapport aux agrégats de calcaire.

- **Propriétés mécaniques**

Le comportement mécanique du béton de céramique dépend des propriétés de ces agrégats, ces propriétés concernant la résistance à la flexion, la résistance à la compression et la ténacité.

Dans plusieurs études, il a été observé que l'incorporation d'agrégats de céramique dans le béton augmentait la résistance à la compression. Cela est particulièrement valable pour les agrégats de céramique à faible capacité d'absorption d'eau, tels que les agrégats de déchets de céramique émaillés. D'autre part, le béton contenant des granulats céramiques à très forte capacité d'absorption d'eau, comme les granulats générés à partir de céramiques de type brique, présente une résistance à la compression inférieure à celle du béton conventionnel (**De Brito & Saikia, 2013**).

(**Pacheco-Torgal & Jalali, 2010**) ont observé que la résistance à la compression est plus élevée pour deux types de bétons contenant des déchets de céramique blanche saturée en eau, en remplacement total des agrégats naturels fins et grossiers par rapport au béton conventionnel (**Figure II.1 (a)**). Les agrégats céramiques remplaçant le sable ont été plus efficaces que les agrégats céramiques grossiers afin d'augmenter la résistance à la compression du béton après 28 jours. (**Lopez et al., 2007**) ont également observé que la

résistance initiale à la compression plus élevée (jusqu'à 28 jours) avec des teneurs en agrégats de céramique comprises entre 10 et 50% en poids, en remplacement du sable naturel. La résistance à la compression augmentait également avec l'âge et le durcissement des bétons. **(Senthamarai & Manoharan, 2005)** ont observé une réduction maximale de 3,8 % de la résistance à la compression pendant 28 jours du béton pour des agrégats de déchets de céramiques grossiers avec différents rapports E / comparant aux bétons avec des agrégats naturels. **(Figure II.1 (b)) (Senthamarai & Manoharan, 2005).**

(Guerra et al., 2009) ont observé une résistance à la compression similaire à 28 jours pour le béton avec des agrégats de déchets de porcelaine hygiénique remplaçant 3% en poids d'agrégats grossiers naturels ; Cependant, la résistance à la compression augmentait avec la teneur en agrégats de céramique à des niveaux de remplacement de 5 et 7%, mais diminuait légèrement à un niveau de remplacement de 9% même si elle était toujours supérieure à celle du béton de référence.

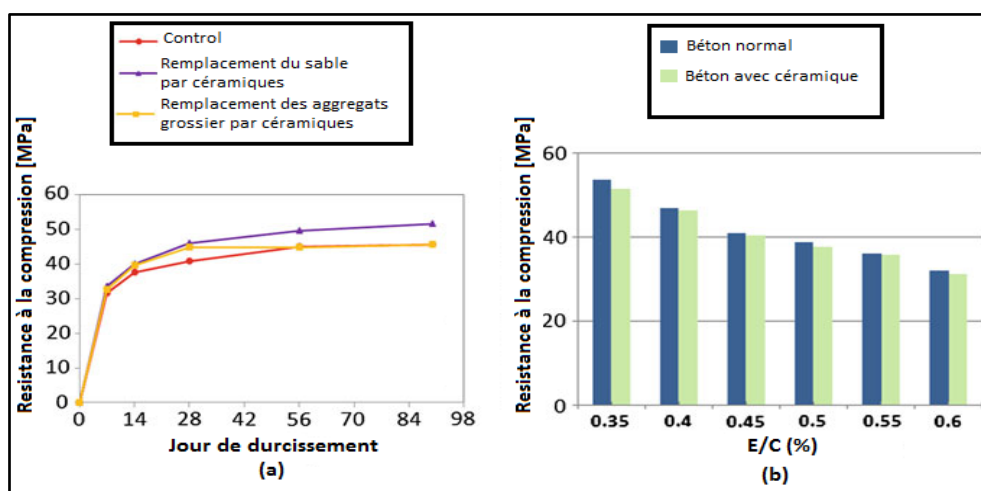


Figure II.1 : Résistance à la compression du béton avec divers types de granulats céramiques (a) : (Pacheco-Torgal & Jalali, 2010) ; (b) : (Senthamarai & Manoharan, 2005)

(Suzuki et al., 2009) ont rapporté l'effet du durcissement interne sur diverses propriétés, y compris la résistance à la compression du béton avec des agrégats de céramique rouge poreux, en remplacement de 0 à 40% en volume des agrégats grossiers naturels. L'ajout d'agrégats de céramique n'a pas d'effet direct sur la résistance à la compression après 3 et 7 jours, mais celle-ci augmente avec la teneur en agrégats de céramique. La résistance à la compression du béton à 28 jours avec un remplacement d'agrégats naturels à 40% en volume par des agrégats de céramique était supérieure à 20 % à celle du béton à agrégats naturels.

Les autres rapports d'évaluation des propriétés de résistance du béton avec des agrégats de céramique concernent, la résistance à la rupture et à la flexion, ainsi que le module d'élasticité

(E). En général, le remplacement du sable naturel par des déchets de céramique jusqu'à 36% améliore clairement les propriétés mécaniques à la rupture. Il est clairement évident que les résistances à la flexion et à la compression augmentent avec la teneur croissante en déchets de céramiques (Seitl et al., 2017).

Les gammes correspondantes de résistances à la traction et à la flexion pour le béton conventionnel étaient de 3,9 à 5,5 MPa et de 5 à 7 MPa, respectivement ; Les auteurs ont observé des rapports de résistances à la traction, à la flexion et à la compression, plus faibles pour le béton contenant des agrégats de céramique que pour le béton ordinaire; Le module d'élasticité du béton à base d'agrégats de déchets classiques et céramiques variait dans les gammes de 16,5 à 25,1 GPa et de 16,1 à 22,2 GPa, respectivement, à différents rapports w / c (De Brito & Saikia, 2013).

(Seitl et al., 2017) Ils ont enregistré une augmentation de la résistance à la flexion pouvant atteindre 36%. Les valeurs de ténacité pour le second cas diminuent, **Figure II.2**, de manière faible. En outre, la variabilité de toutes les propriétés testées a également augmenté de façon remarquable. La différence entre les composites les plus faibles et les plus forts est égale à 24% et atteint pour la ténacité. Les valeurs normalisées de résistance à la flexion, à la compression et à la rupture sont illustrées à la **Figure II.2**.

L'utilisation d'agrégats de céramique recyclés en remplacement d'agrégats dans le béton est certainement faisable; un mélange de granulats céramiques usagés permet d'obtenir une résistance à la flexion, une résistance à la compression et une ténacité supérieures à celles d'un composite de ciment par rapport au sable naturel ordinaire ; L'un des avantages de l'utilisation des déchets de céramique réside dans le fait que la valeur de la densité diminue et que la même quantité de béton à moins de poids (Seitl et al., 2017).

La résistance à la flexion, comme pour la résistance à la compression, diminue avec l'augmentation du pourcentage de remplacement des agrégats de calcaire par des agrégats de céramique (De Brito et al., 2005). Là encore, ces résultats indiquent une relation linéaire approximative entre les deux facteurs. De plus, la réduction relative de la résistance à la flexion lorsque tous les agrégats grossiers sont remplacés n'est que de 26%, soit beaucoup moins que celle de la résistance à la compression. (**Figure II.3**).

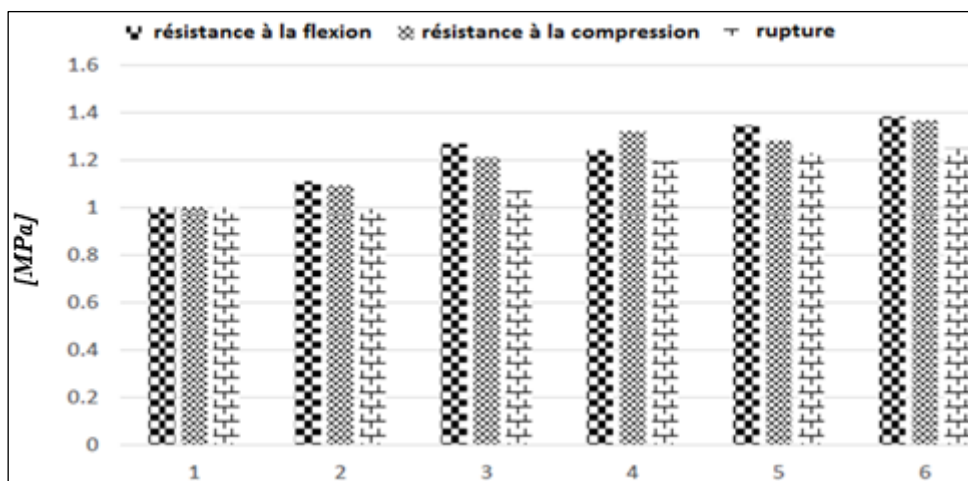


Figure II.2: Valeurs normalisées de résistance à la flexion, de résistance à la compression et de rupture (Seitl et al., 2017)

(Suzuki et al., 2009) ont observé une tendance à la baisse de la résistance à la traction par scission à 28 jours du béton haute performance (BHP) avec une teneur croissante en granulats céramiques poreux (Après avoir observé une légère augmentation du taux de remplacement en volume de 10% en volume des granulats grossiers), du fait d'une perte plus faible d'adhérence inter-faciale d'agrégats de céramique.

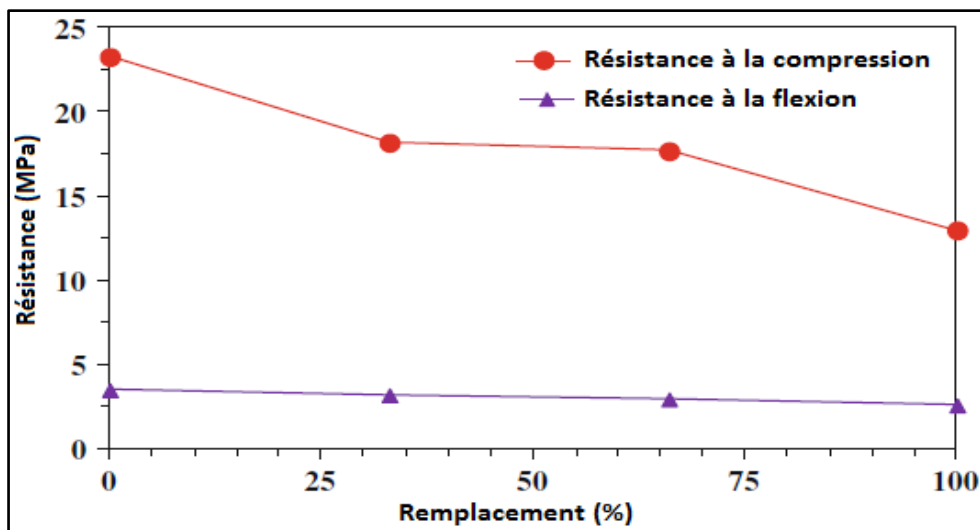


Figure II.3: Résistance à la compression et résistance à la flexion du béton avec agrégats céramiques usagés (De Brito et al., 2005)

Le module d'élasticité de Young diminue également avec l'augmentation de la teneur en agrégats de céramique. Cependant, (Topçu & Canbaz, 2007) ont observé une réduction significative de la résistance à l'abrasion du béton en raison de l'ajout de déchets de carreaux de céramique en remplacement partiel ou total des particules fines.

- Durabilité

(De Brito & Saikia, 2013) ont aussi cité des propriétés de durabilité telles que l'absorption d'eau, la résistance au gel-dégel et le retrait qui ont été rapportées dans diverses références, même si le nombre de références pour chaque type d'agrégats de céramique n'est pas substantiel. (Debeib & Kenai, 2008) ont observé un retrait plus important du béton avec brique concassée comme substitut partiel ou total des granulats fins et grossiers par rapport au béton à granulats naturels. Le retrait augmente avec le contenu des deux types d'agrégats. L'augmentation du retrait était plus marquée pour le béton contenant des agrégats céramiques fins que pour les agrégats céramiques grossiers, probablement en raison du mouvement de l'eau présente dans les agrégats de briques fines, le séchage progressif ayant modifié les conditions d'humidité (Figure II.4).

La présence de déchets céramiques rouges poreux en remplacement partiel des agrégats naturels grossiers peut considérablement réduire le retrait autogène du béton à haute performance lorsqu'il est soumis à un durcissement interne (Suzuki et al., 2009). La réduction du retrait augmente avec la teneur en agrégats de céramique dans le béton (Figure II.5).

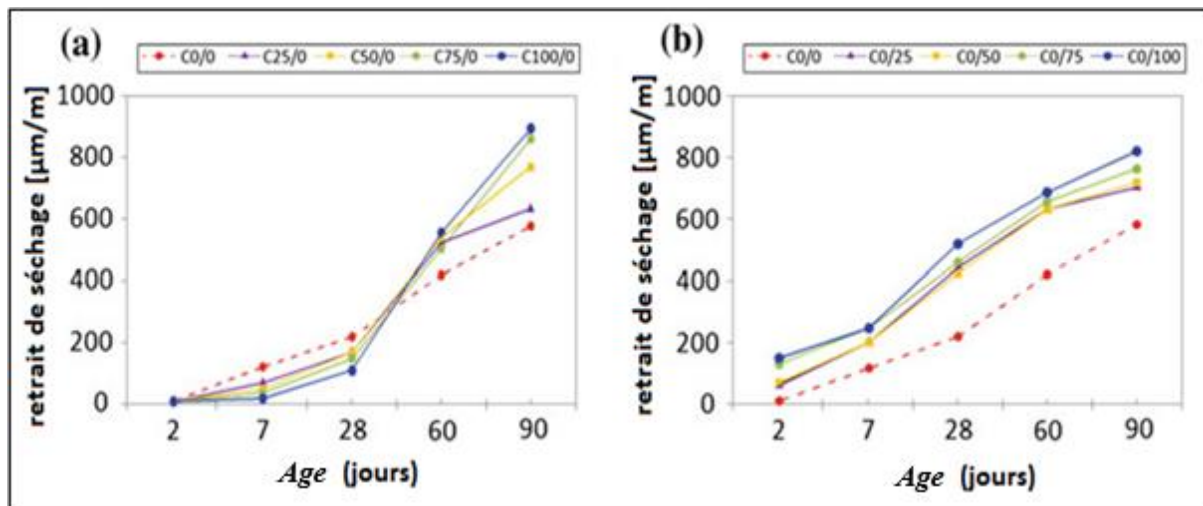


Figure II.4: Comportement du retrait de séchage des agrégats de déchets en céramique de béton (a) : grossier ; (b) fin (Debeib & Kenai, 2008)

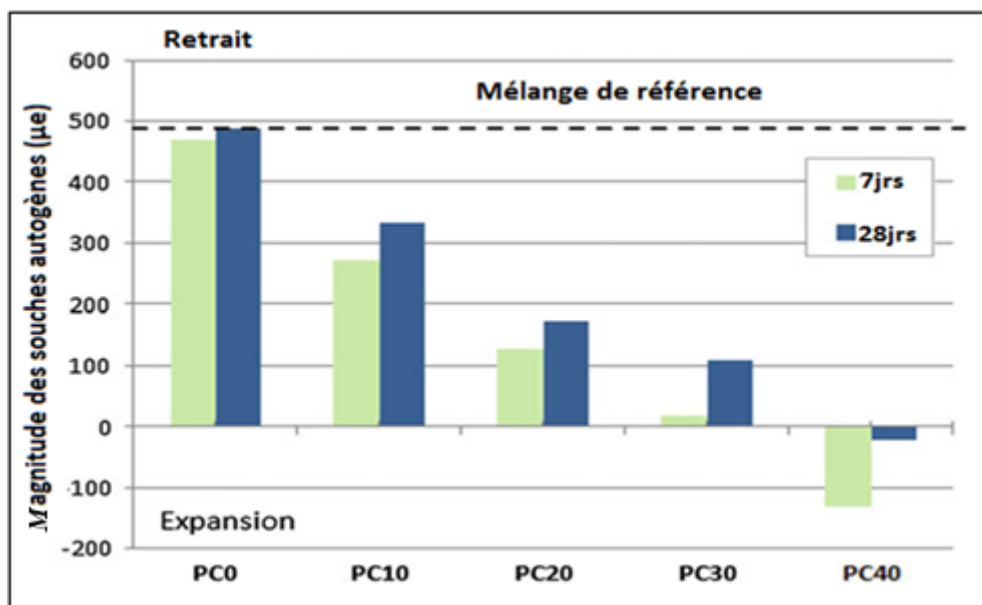


Figure II.5: Comportement de retrait autogène du béton avec des agrégats de déchets céramiques (Suzuki et al., 2009)

(Pacheco-Torgal & Jalali, 2010) ont constaté que la perméabilité à l'eau et à l'oxygène sont plus faibles pour le béton avec des déchets de céramique sous forme d'agrégats fins (MCS) et (MCCA) grossiers par rapport au béton conventionnel (Figure II.6 (a)) ; Cependant, l'absorption d'eau sous vide des déchets de béton conventionnel était négligeable par rapport à celle du béton d'agrégats de céramique (Figure II.6 (b)).

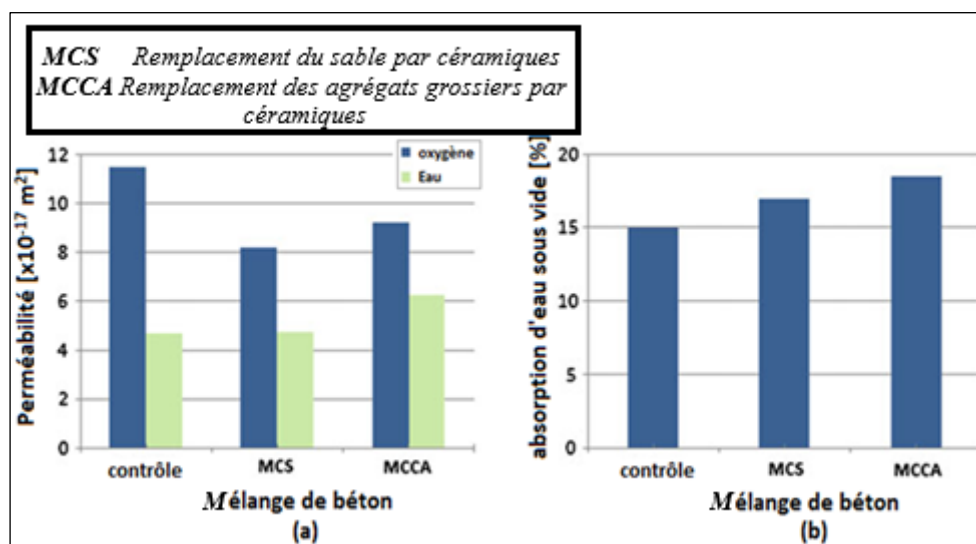


Figure II.6: Perméabilité du béton d'agrégats de déchets conventionnels et céramiques (Pacheco-Torgal & Jalali, 2010)

II.3.2 Valorisation des déchets de plastiques

- **Propriétés du béton frais**

L'intégration d'agrégats de plastiques affecte fortement les différentes propriétés du béton frais en raison de leur nature polymère ainsi que de leur forme, de leur taille, de leur porosité et de leur nature légère (**De Brito & Saikia, 2013**).

Il existe deux points de vue différents sur le comportement de mise en œuvre du béton à base d'agrégats plastiques. Dans la majorité des études, les valeurs d'affaissement des bétons frais sont inférieures en raison de l'incorporation de plusieurs types d'agrégats de plastique par rapport à celles du béton conventionnel ont été observées. L'augmentation du taux de remplacement d'agrégats de plastiques réduit davantage l'affaissement (**Batayneh et al., 2007 ; Frigione, 2010 ; Ismail & AL-Hashmi, 2008 ; Kou et al., 2009**).

(**Saikia & Brito, 2010**) ont constaté que l'affaissement du béton contenant des agrégats PET cylindriques à la texture de surface très lisse était légèrement supérieur à celui du béton contenant des agrégats ordinaires. Les auteurs ont également observé une diminution des valeurs d'affaissement dans le béton en raison de l'ajout d'agrégats plastiques feuilletés fins et grossiers, du fait que ces agrégats de PET ont des arrêts plus nets comparés aux agrégats naturels.

L'incorporation d'agrégats de déchets plastiques a entraîné une réduction de la densité de particules fraîches, en raison de la faible densité des particules des agrégats de déchets plastiques. Cette perte de masse augmente avec le taux de remplacement (**De Brito et al., 2014**).

(**Ismail & AL-Hashmi, 2008**) ont constaté que les densités des mélanges de béton frais à base de granulats de plastiques récupérés ont tendance à diminuer. Cette tendance peut être attribuée au fait que la densité de déchets plastiques est inférieure de 69,7 % à celle du sable, ce qui entraîne une réduction de la densité du béton frais.

- **Propriétés mécaniques**

La résistance à la compression des composites de bétons et mortiers de ciment est une propriété fondamentale, étudiée de manière approfondie dans presque toutes les études associées aux agrégats plastiques (**De Brito & Saikia, 2013**).

En augmentant le taux de déchets de plastique, les résultats montrent une tendance à la baisse des valeurs de résistance à la compression des mélanges de béton d'agrégats de plastique usagés en dessous des mélanges ordinaires. Cette tendance peut être attribuée à la diminution de la force d'adhérence entre la surface du plastique de rebut et la matrice cimentaire, ainsi qu'à la taille des particules du plastique (**Ismail & AL-Hashmi, 2008**).

(**Akcaozoglu et al., 2010**) ont étudié l'utilisation de granulés de bouteille déchiquetés en polyéthylène téréphtalate (**PET**) en tant qu'agrégats légers dans la préparation de mortier ;

Les valeurs de résistance à la compression des mortiers mesurées en laboratoire à 28 jours étaient très supérieures à 17 MPa.

De manière similaire à la résistance à la compression, l'incorporation de tout type d'agrégats plastiques diminue la résistance à la flexion du béton. (**Ismail & AL-Hashmi, 2008 ; Kou et al., 2009, Saikia & De Brito, 2014, Hossain et al., 2016, Martínez-López et al., 2018**). Cette tendance peut être imputable à la diminution de la force d'adhérence entre la surface des particules de plastique et de la pâte de ciment, ainsi qu'à la nature hydrophobe de la matière plastique, susceptible de limiter l'hydratation du ciment (**Ismail & AL-Hashmi, 2008**).

(**Remadania et al., 2009**) ont constaté une diminution des valeurs de résistance à la flexion pour les mortiers allégés de façon similaire. (**Batayneh et al., 2007**) ont observé une tendance à la baisse de la résistance à la flexion avec l'augmentation de la teneur en agrégats de déchets plastiques dans le béton.

(**Akcaozoglu et al., 2010**) ont conclu que les valeurs de résistance à la traction en flexion ne contenant que des agrégats de PET étaient proches des mortiers contenant du PET et des agrégats de sable.

La (**Figure II.7**), (**Gesoglu et al., 2017**), illustre les résistances à la traction par flexion des bétons à base de déchets plastiques à 28 jours. Comme pour les résultats de résistance à la compression, le béton contenant de la poudre de plastique présentait des valeurs de résistance inférieures à celles du mélange témoin. La tendance de la réduction de la résistance à la traction a été préservée dans les résultats de résistance à la flexion nette. Cette réduction est devenue plus prononcée chaque fois que le niveau de remplacement du plastique augmentait.

Selon la norme ASTM C 469, le type d'agrégats influe sur le module, car la déformation produite dans le béton est partiellement liée à la déformation élastique des agrégats (**De Brito & Saikia, 2013**). Les résultats obtenus montrent que la dégradation du module d'élasticité ressentie par le béton avec les agrégats de déchets plastiques est plus prononcée que celle du béton de référence (**De Brito et al., 2014**).

(**Gesoglu et al., 2017**) ont observé que l'effet de la poudre de plastique sur les résultats du module d'élasticité (**Figure II.8**). Il est évident que la poudre de plastique a eu un effet négatif sur les résultats. Le remplacement de 25% de la teneur en ciment par la poudre de plastique a réduit l'élasticité de 28% par rapport au béton de référence.

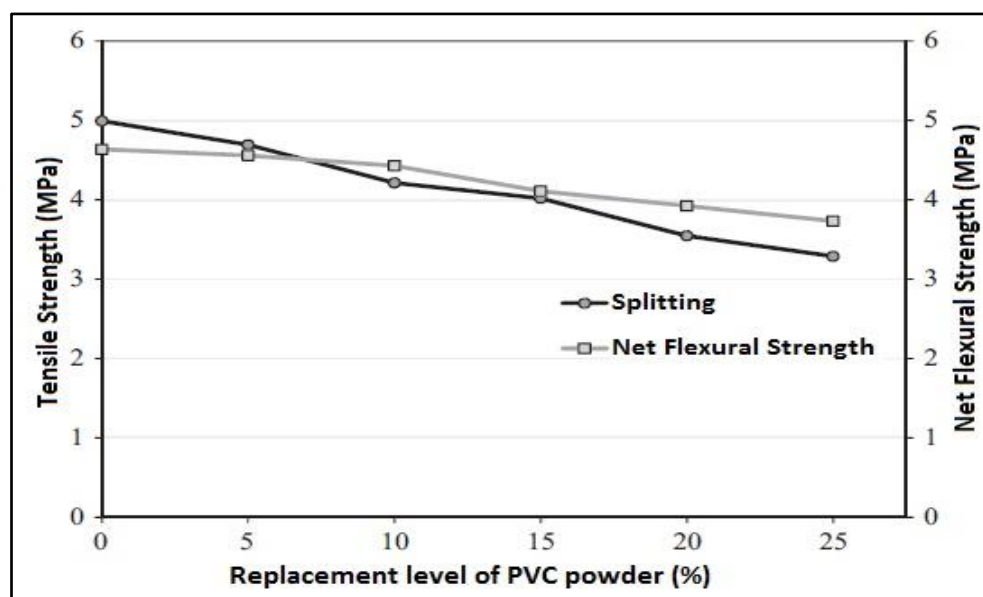


Figure II.7: Variation de la résistance à la traction et de la résistance à la flexion nette en fonction de la teneur en poudre de PVC (**Gesoglu et al., 2017**)

Les valeurs du module d'élasticité diminuent avec l'augmentation de la teneur en PVC. Ceci est dû à : (1) les granulats de PVC ont un module d'élasticité inférieur à celui de la pâte de ciment ; et (2) les résistances à la compression des mélanges PVC-béton de granulats légers ont été considérablement réduites (**Kou et al., 2009**).

• Durabilité

Généralement, la perméabilité des éléments chimiques agressifs à travers les pores du béton est le facteur majeur contrôlant plusieurs propriétés de durabilité. Des essais tels que l'absorption d'eau, la perméabilité aux gaz et la mesure de la perméabilité aux chlorures

peuvent fournir des informations sur la vulnérabilité du béton à la pénétration d'espèces chimiques nuisibles (De Brito & Saikia, 2013).

(Kou et al., 2009) ont observé que le retrait au séchage du béton diminue avec l'augmentation de la teneur en PVC ; les résultats sont illustrés à la **figure II.9**. On peut supposer que les granulés de PVC sont imperméables et n'absorbent pas l'eau par rapport au sable et ne rétrécissent pas. Ils pourraient donc réduire le retrait global du béton.

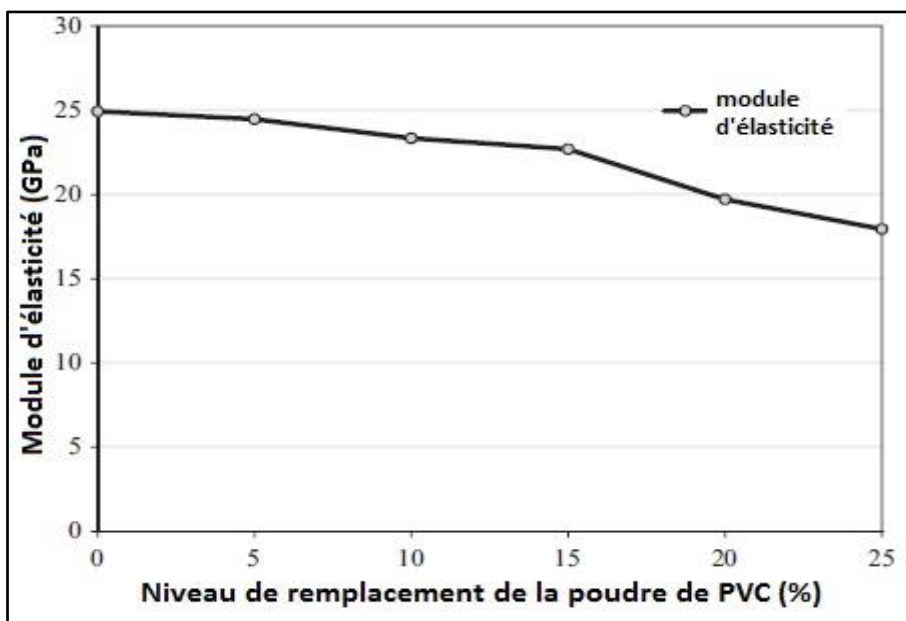


Figure II.8: Variation du module d'élasticité en fonction de la teneur en poudre de PVC (Gesoglu et al., 2017)

Les valeurs de retrait des mortiers au laitier étaient inférieures à celles des mortiers au ciment, quel que soit le type d'agrégat PET ou les agrégats de sable. Le mélange de laitier de haut fourneau avec du ciment peut réduire le retrait du mortier pour les deux types d'agrégats (PET uniquement et mélange sable-PET) (Akcaozoglu et al., 2010).

Les taux d'absorption d'eau des mortiers contenant du PET et du sable étaient inférieurs à ceux des mortiers contenant 100% d'agrégats de PET. (Akcaozoglu et al., 2010) ont constaté une tendance similaire pour le mortier de ciment avec un mélange d'égale masse de laitier de haut fourneau et de ciment Portland normal, bien que l'addition de laitier de haut fourneau avec du ciment Portland normal augmente l'absorption d'eau et la porosité du mortier de ciment obtenu (De Brito & Saikia, 2013).

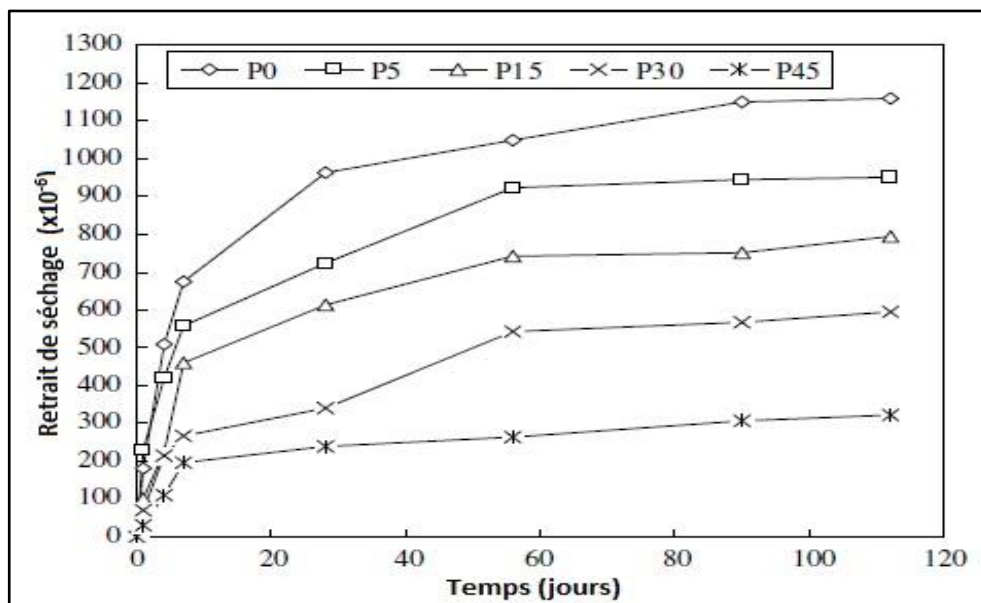


Figure II.9: Retrait de séchage des mélanges de béton (Kou et al., 2009)

II.3.3 Valorisation des déchets de caoutchouc

- Propriétés du béton frais

L'ajout de caoutchouc au béton affecte ses diverses propriétés à l'état frais. Ceci est dû à sa nature polymère, ainsi qu'à sa forme, sa taille et sa légèreté. (De Brito & Saikia, 2013).

La valeur d'affaissement, utilisée pour la description de l'ouvrabilité d'un béton frais dans des conditions non confinées, est un test sensible. C'est la vérification principale de la consistance du béton frais pour répondre à la spécification recommandée par la réglementation (Hilal, 2016).

(Khaloo et al., 2008) ont observé une augmentation de l'affaissement dans le cas de l'incorporation d'agrégats fins et grossiers pour pneus en caoutchouc en remplacement partiel des agrégats normaux avec des concentrations d'agrégats inférieures à 15% et qui atteint une valeur maximale lorsque la concentration d'agrégats était de 15%. Des concentrations globales de pneus supérieures à 15% réduisaient l'affaissement (Figure II.10).

(Hilal, 2016) ont constaté que le béton caoutchouté auto-plaçant a tendance à perdre l'ouvrabilité en moins de temps par rapport au mélange de référence conventionnel. Les échantillons de béton caoutchouté ont une ouvrabilité acceptable en termes de facilité de la manipulation, le placement et la finition (Khaloo et al., 2008).

(Mavroulidou & Figueiredo, 2010) ont montré que la plupart des mélanges pour les tailles et les pourcentages de caoutchouc utilisés dans cette étude, à l'exception des mélanges à 40% pour les agrégats fins ou grossiers et à 30% pour les agrégats fins, présentaient des valeurs d'affaissement correspondant à des niveaux d'ouvrabilité plus élevés par rapport aux niveaux conventionnels. En fait, pour de faibles pourcentages de caoutchouc (10 %), l'ouvrabilité basée sur les résultats d'affaissement est comparable à celle des échantillons de référence.

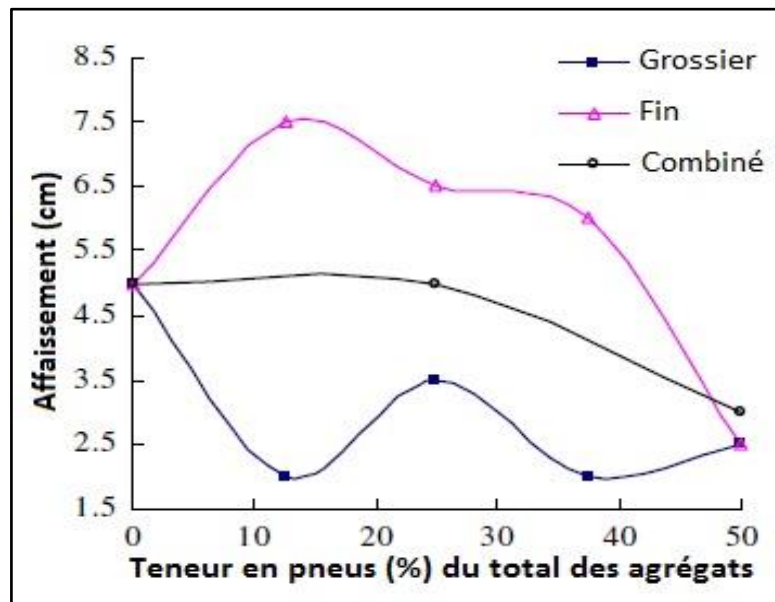


Figure II.10: Propriétés du béton frais (Khaloo et al., 2008)

L'utilisation d'agrégats de caoutchouc dans les mélanges de béton et de mortier diminue leur densité, en raison du remplacement d'agrégats naturels beaucoup plus lourds par des agrégats de pneus en caoutchouc plus légers. L'augmentation de la teneur en caoutchouc réduit davantage la densité du béton (De Brito & Saikia, 2013).

(Sukontasukkul & Chaikaew, 2006) ont indiqué que la densité sèche diminuait avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc. Bien qu'il existe un consensus général sur le fait que l'ajout d'agrégats de caoutchouc réduit la densité du béton obtenu, de nombreuses études montrent de fortes variations de l'ampleur de la réduction de la densité (De Brito & Saikia, 2013). L'augmentation de la teneur en caoutchouc réduit le poids unitaire du béton, ce qui permet d'obtenir des bétons plus légers (Khaloo et al., 2008).

- **Propriétés mécaniques**

D'après les études effectuées dans ce domaine, l'ajout de granulats de caoutchouc réduit la résistance à la compression du béton composite obtenu et que l'augmentation de la teneur en caoutchouc influe considérablement sur la résistance à la compression. Cette chute de résistance peut atteindre d'environ 80 à 90% de la résistance à la compression de référence en fonction de la taille et du type d'agrégats de caoutchouc utilisés (**De Brito & Saikia, 2013**).

Il a été aussi observé que, l'augmentation de la longueur des fibres et du remplacement des agrégats de caoutchouc dans les échantillons de béton, une chute était constatée après 28 jours, concernant la résistance à la compression. En outre, il a été déterminé que le remplacement des agrégats de caoutchouc à 5% et 10% pour une longueur de 25 mm avait une contribution positive à la résistance à la compression (**Bideci et al., 2017**).

La résistance à la compression des mélanges de béton contenant du caoutchouc ébréché (**Ganjian et al., 2009**) comme substituant de gros granulats et broyé comme remplacement de ciment, a une faible réduction par rapport au béton de référence (**Figure II.11**). Celle-ci était principalement due à la réduction de la teneur en ciment de ces mélanges. Les raisons de la chute de la résistance à la compression du béton lors de l'utilisation de caoutchouc étaient davantage liées aux propriétés différentes des particules de caoutchouc et des agrégats substitués.

(**Hilal, 2016**) ont observé que la résistance à la compression diminuait à mesure que la teneur en caoutchouc augmentait. Les résultats en (**Figure II.12**) montrent qu'il est possible d'utiliser une grande quantité de copeaux de pneus pour les bétons ne nécessitant pas un niveau de résistance supérieur. Il a été constaté que le meilleur type de remplacement était le caoutchouc mélangé à base de granulas, qui offrait les meilleurs résultats car c'était un substituant compatible pour le sable et le gravier. Le caoutchouc granulé est un matériau mou, comparé aux agrégats naturels. L'utilisation de caoutchouc granulaire dans la production de béton entraîne une diminution de la résistance à la compression. En outre, l'adhérence entre les particules de caoutchouc et la pâte de ciment est faible.

Concernant la résistance à la traction, (**Ganjian et al., 2009**) ont rapporté que le taux de réduction de la résistance à la traction dans le premier mélange (Utilisant du caoutchouc déchiqueté en remplacement partiel d'un agrégat naturel) était environ le double de celui du second mélange (Utilisant des particules de caoutchouc broyées pour le même niveau de

remplacement). La réduction de la résistance à la traction avec un taux de remplacement de 7,5 % était de 44% pour le béton avec caoutchouc gommé et de 24% pour le béton avec caoutchouc broyé par rapport au mélange témoin.

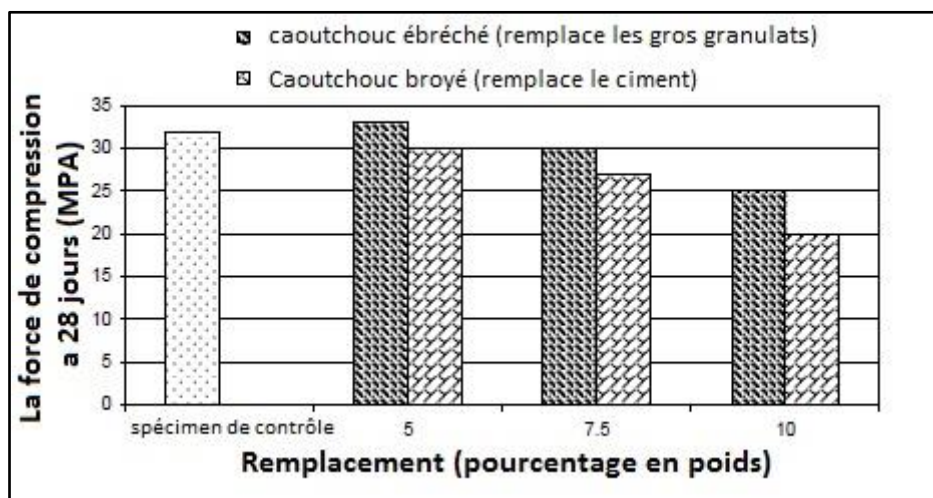


Figure II.11: Résultats du test de résistance à la compression a 28 jours (Ganjian et al., 2009)

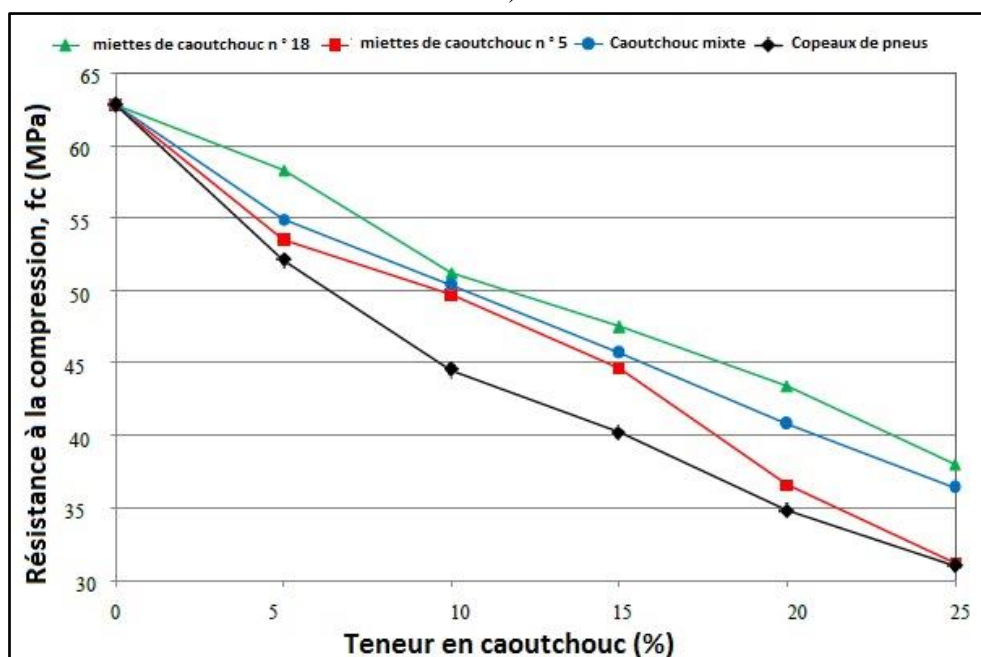


Figure II.12: Variation de la résistance à la compression a 28 jours en fonction de la taille et du contenu des copeaux de caoutchouc et des copeaux de pneu (Hilal, 2016)

L'incorporation d'agrégats de caoutchouc diminue la résistance à la flexion du béton résultant et l'augmentation de la teneur en caoutchouc affaiblit encore la résistance à la flexion en raison de l'adhérence entre la pâte de ciment et les particules de caoutchouc. Comme pour le cas de la réponse à la compression, la résistance à la flexion des blocs de béton en granulés

de caoutchouc s'est avérée inférieure à celle des blocs de béton normaux. (Sukontasukkul & Chaikaew, 2006)

Les résultats des essais de résistance à la flexion sont illustrés à la (Figure II.13). Le remplacement du caoutchouc réduit la résistance à la flexion comme prévu. La réduction de la résistance à la flexion s'est produite dans les deux mélanges et seul le taux était différent. Par exemple, une réduction de 37% par rapport à l'échantillon de référence a été observée dans le premier mélange (remplacement partiel des agrégats normaux par du caoutchouc déchiqueté) (Ganjian et al., 2009).

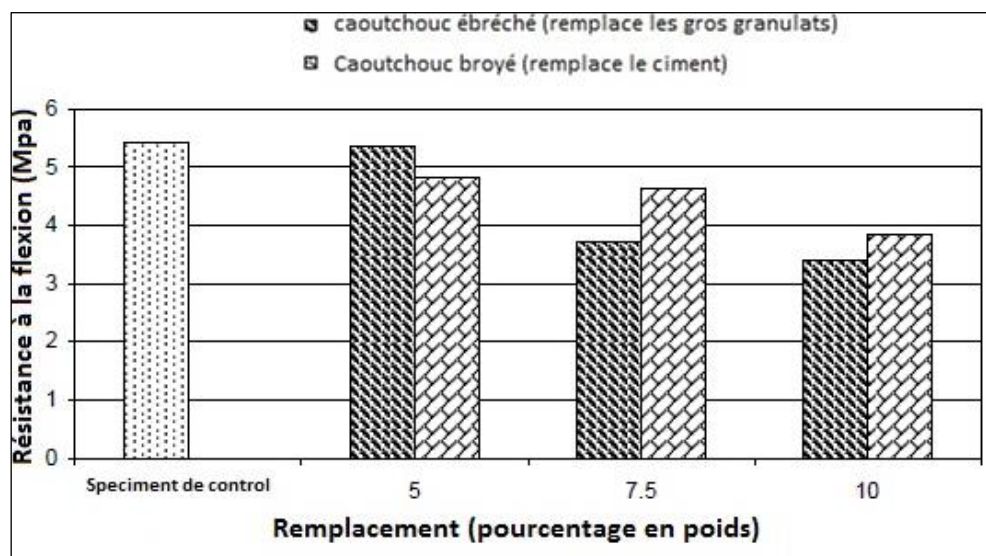


Figure II.13: Résultats du test de résistance à la flexion (Ganjian et al., 2009)

L'incorporation de granulats ou de copeaux de caoutchouc sous forme d'agrégats dans le béton réduit considérablement les modules d'élasticité statiques et dynamiques. Les caractéristiques des agrégats affectent le module d'élasticité pour les bétons avec des agrégats de rigidité supérieure qui possèdent un module d'élasticité élevé. Étant donné que les granulats de caoutchouc ont une rigidité très faible, par rapport aux granulats naturels, l'addition de granulats de caoutchouc abaisse le module d'élasticité du béton obtenu (De Brito & Saikia, 2013).

(Gesoglu & Guneyisi, 2011) ont montré que le remplacement des granulats naturels fins et grossiers par des granulats de caoutchouc avait une influence négative sur les modules d'élasticité statique et dynamique. Les modules statiques et dynamiques ont été réduits avec l'augmentation du niveau de remplacement du caoutchouc.

(Mavroulidou & Figueiredo, 2010) ont observé que le module d'élasticité est réduit lors de l'ajout d'agrégats de caoutchouc, en particulier pour les agrégats de caoutchouc fins, entraînant une perte de rigidité, ce qui entraînerait une augmentation de la flexion des éléments construits avec du béton contenant des agrégats de caoutchouc.

Les caractéristiques des agrégats de caoutchouc diminuent en augmentant le pourcentage de remplacement, comme le montre la **figure II.14**, (Ganjian et al., 2009).

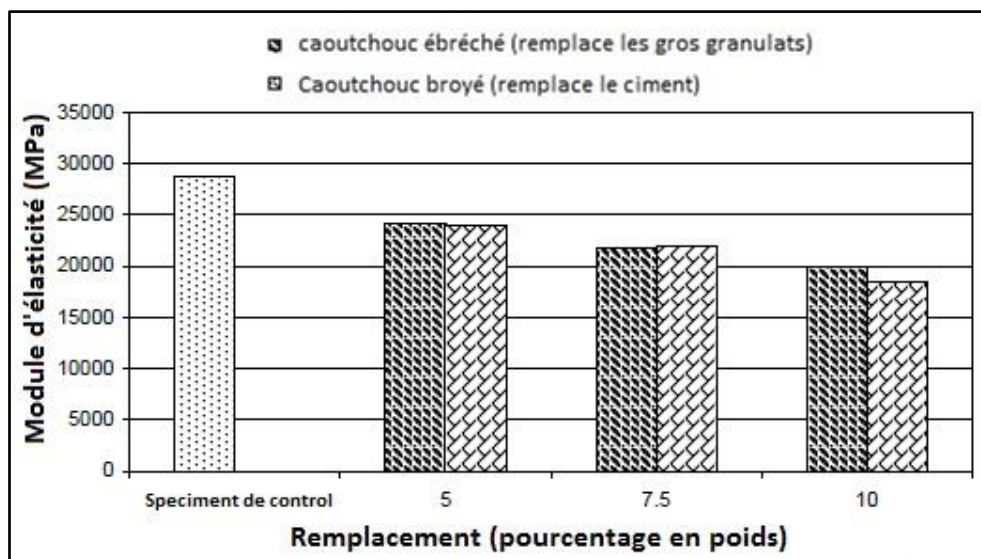


Figure II.14: Résultats du test de module d'élasticité (Ganjian et al., 2009)

- **Durabilité**

(Uygunoglu & Topcu, 2010) ont observé que le retrait de séchage a augmenté de manière significative dans le mortier auto-consolidant à forte teneur en caoutchouc (40% et 50%) et le rapport (Eau-Poudre) de 0,51 à 28 jours (**Figure II.15**). Ceci est dû à l'augmentation de la structure poreuse en auto-consolidation mortier à haute teneur en eau. Un retrait moins important du mortier auto-consolidant préparé en remplaçant 10% et 20% du sable par des agrégats de caoutchouc.

La perméabilité est le facteur le plus efficace pour évaluer la durabilité du béton caoutchouté. Une réduction de la perméabilité du béton améliore ses autres caractéristiques, notamment sa résistance aux conditions environnementales telles que les cycles de gel et de dégel aussi. La réduction de la corrosion du béton et des barres d'acier exposées à des acides et des minéraux agressifs. (Ganjian et al., 2009) ont montré que le remplacement du

caoutchouc augmente la profondeur de la perméabilité à l'eau dans les mélanges de béton composite caoutchouté.

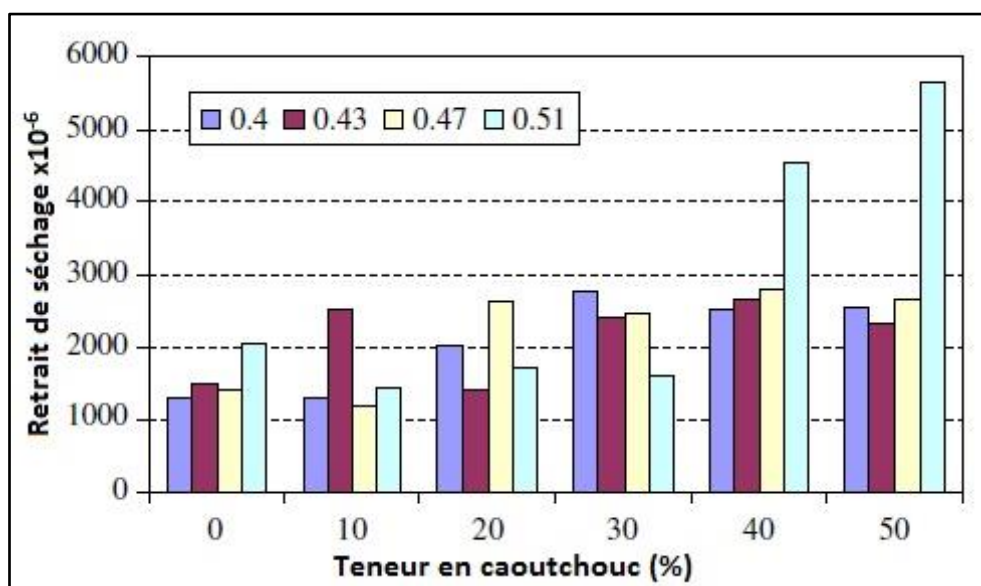


Figure II.15: Retrait de séchage du mortier auto-consolidant caoutchouté à 28 jours selon le rapport Eau / Poudre (Uygunoglu & Topcu, 2010)

(Bideci et al., 2017) ont rapporté que les bétons avec des granulats remplacés par des agrégats de caoutchouc ont un rapport d'absorption d'eau plus élevé que les bétons témoins. Lorsque le pourcentage de remplacement des agrégats de caoutchouc et le rapport de longueur augmentent, le rapport d'absorption d'eau augmente en conséquence.

II.3.4 Valorisation des déchets de verre

- **Propriétés du béton frais**

Il a été observé que l'ajout de fibres de verre dans le béton a tendance à affecter sa maniabilité. (Patel et al., 2019) ont affirmé que les fibres de verre recyclées présentent de meilleures performances que les agrégats bruts dans le béton, aussi, l'ajout de fibres affecte la maniabilité du béton et dépend du type et de la quantité de fibres. (Malek et al., 2020) ont constaté qu'une diminution de l'affaissement du cône d'Abrams a été observée lors de l'ajout de granulats de verre recyclés au mortier, à l'exception de 5 % en poids de granulats de sable de verre (Figure II.16). Par contre, (Batayneh et al., 2007) indique que la présence du verre concassé dans les mélanges de béton n'affecte pas la maniabilité du béton.

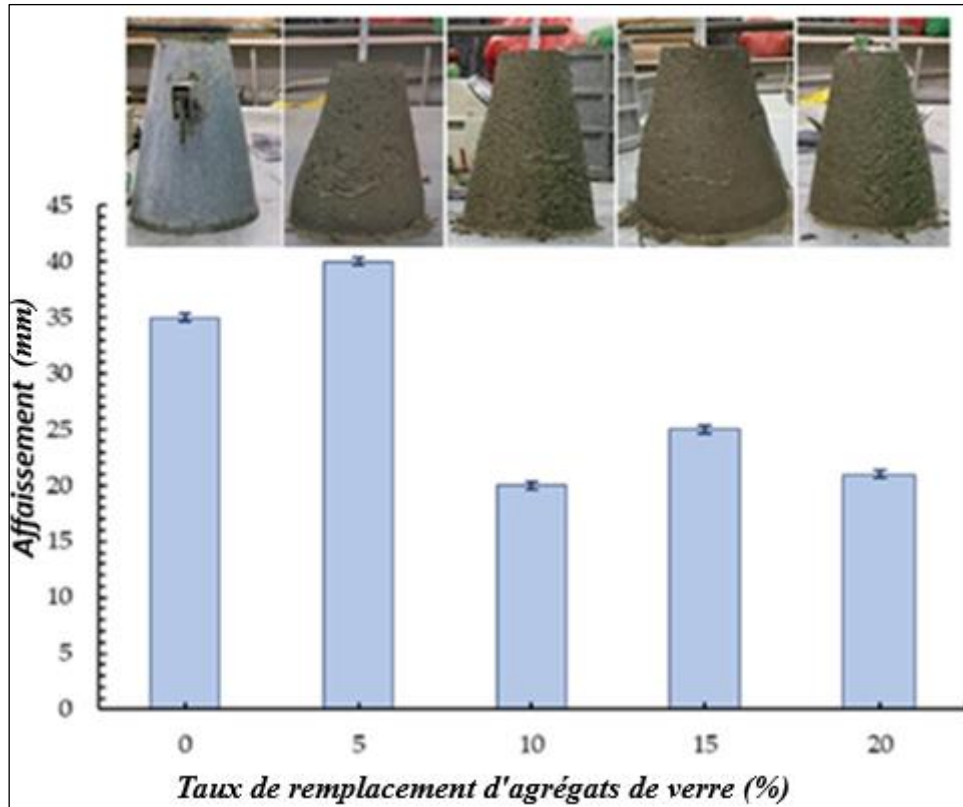


Figure II.16: Résultats d'essai d'affaissement pour différents taux de remplacement de verre (Malek et al., 2020)

(Chaitanya kumar et al., 2016) ont observé que l'ouvrabilité du béton augmente de 1% avec l'ajout de fibre de verre. (Chandramouli et al., 2010) ont conclu que l'ajout de fibre de verre dans le béton donne une réduction du ressuyage ; cette réduction du ressuyage améliore l'intégrité de la surface du béton, améliore son homogénéité et réduit la probabilité que des fissures se produisent.

Les principaux avantages des fibres de verre concernant leurs faibles densités et leurs capacités de dispersion uniformément et d'orientation de manière aléatoire au sein de la matrice cimentaire (Loukil et al., 2019).

- **Propriétés mécaniques**

Des tests de résistance à la compression ont été effectués par de nombreux chercheurs sur des bétons composites à base de fibres de verre recyclées. (Bishetti et al., 2019) ont révélé que la résistance à la compression à 7 jours, 14 jours et 28 jours du béton renforcé à base de fibres de verre montre une tendance à la hausse de la résistance à la compression en fonction du pourcentage de remplacement de fibres de verre en termes de volume de béton.

(Loukil et al., 2019) ont rapporté que la résistance à la compression du béton renforcé avec des fibres de verre augmente lorsque la quantité d'incorporation de fibres à 2 %,

cependant, un ajout supplémentaire de 3 % de fibres indique une légère diminution de la résistance à la compression et ils ont conclu aussi que cette perte de résistance à la compression peut s'expliquer par une faible compaction du matériau liée aux espaces occupés par les fibres de verre. En outre, (Naik et al., 2025) ont constaté que la résistance à la compression diminue avec l'augmentation de la teneur en déchets de verre. Malgré cette diminution, les valeurs de résistance restent suffisantes pour les applications en béton, notamment à faible taux de remplacement (Figure II.17).

L'ajout de fibre de verre avec une teneur en fibres de 0.5, 1, 2 et 3 kg/m³ a considérablement augmenté les résistances à la flexion du béton armé de fibre de verre par rapport à l'échantillon de référence (Arslan, 2016). Le renforcement des fibres de verre vierges (neuves) et recyclées avec une concentration croissante a également amélioré la résistance à la flexion du béton, cependant, tous les mélanges de béton présentaient une rupture fragile et aucune déviation post-fissure n'a été observée (Patel et al., 2019).

(Batayneh, et al., 2007) a conclu que la résistance des mélanges de béton a été améliorée par le remplacement partiel des granulats fins par des granulats de verre concassé.

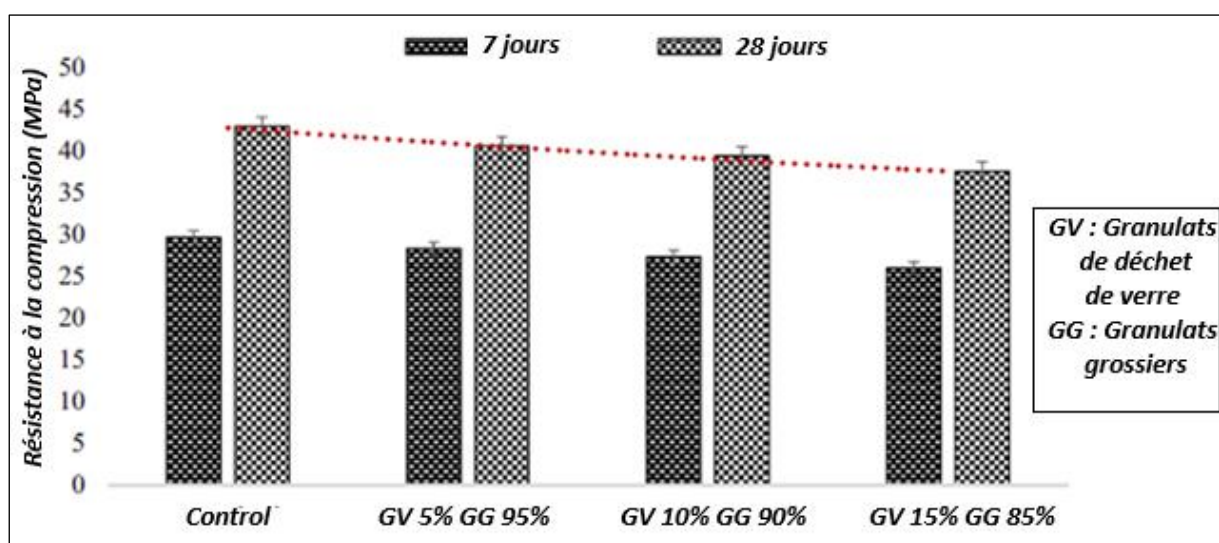


Figure II.17 : Résistance à la compression du cube (Naik et al., 2025)

La résistance à la traction du béton renforcé par des fibres de verre augmente avec un pourcentage de remplacement croissant (Chandramouli et al., 2010 ; Arslan, 2016). L'augmentation en pourcentage de la résistance à la traction est maximale à 0.1 % de fibre de verre pendant 7 jours, 14 jours et 28 jours de durcissement du béton à base de fibres de verre (Bishetti et al., 2019).

(Arslan, 2016) a montré que l'ajout de déchets de verre dans la composition du béton augmente le module d'élasticité par rapport au mélange témoin et que ces valeurs ont les mêmes tendances que la résistance à la compression.

L'ajout de fibres de verre améliore le module de Young, cependant, à partir des différentes valeurs de module d'élasticité mesurées à 7 et 28 jours d'âge, une légère diminution du module d'élasticité est observée pour le béton renforcé par 3 % de fibres de verre (Loukil et al., 2019).

- **Durabilité**

L'ajout de fibres de verre dans le béton ordinaire permet de contrôler la fissuration due au retrait et réduit également la perméabilité de l'eau. L'ajout des fibres aide à améliorer les performances de ductilité Post-Pic, la résistance à la traction avant la fissuration, la résistance à la fatigue, la résistance aux chocs et à la température.

II.3.5 Valorisation des déchets de basalte

- **Propriétés du béton frais**

(Haido et al., 2020) ont étudié les propriétés du béton auto-plaçant frais avec différents teneurs de fibres de basalte, ils ont également révélé que l'utilisation de fibres de basalte dans la production de ce type de béton influe les performances d'ouvrabilités des mélanges de béton, cependant, les teneurs en fibres inférieure à 0,25 % n'ont pas d'effet notable sur les performances de fluidité du béton auto-plaçant frais (Figure II.18).

La principale raison de la réduction du diamètre de l'écoulement d'affaissement grâce à l'utilisation de fibres de basalte peut s'expliquer par le fait que les particules de fibres de basalte absorbent l'eau de gâchage et rendent également la pâte de ciment beaucoup plus faible (Haido et al., 2020).

(Yakhlaf et al., 2015) ont incorporé un volume de fibres de basalte de 0 à 0.5 % dans un béton ordinaire vibré et ils ont conclu que les fibres de basalte ont affecté l'ouvrabilité qui a nécessité un réducteur d'eau afin d'améliorer l'ouvrabilité du béton obtenu.

Le poids unitaire du mélange de béton a diminué à mesure que les fibres de basalte augmentaient, en raison du fait que les fibres de basalte étaient le composant le plus léger dans les mélanges de béton (Yakhlaf et al., 2015).

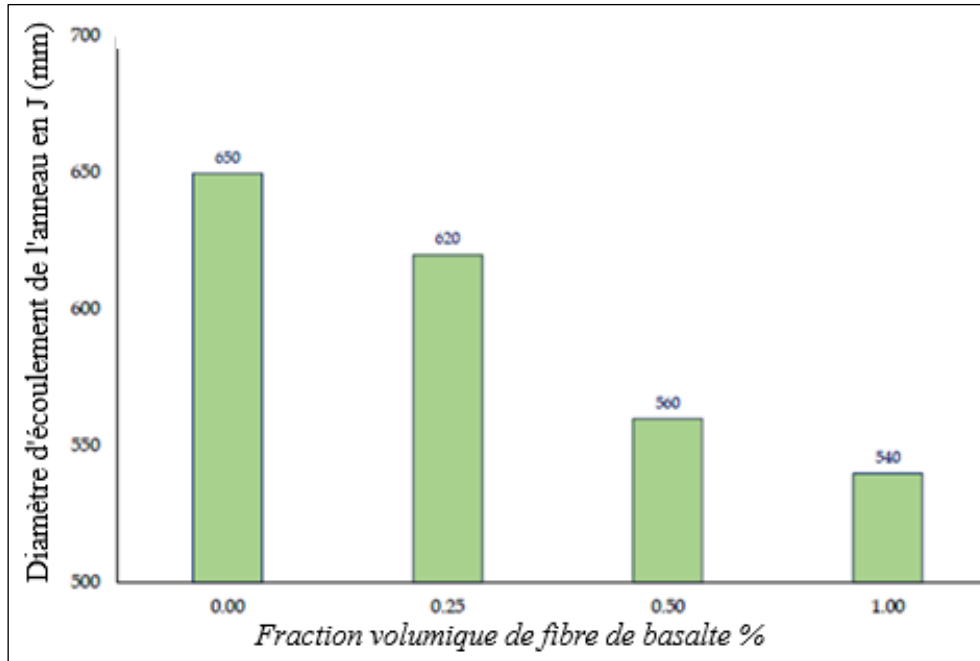


Figure II.18 : Variation du diamètre d'écoulement de l'anneau en J des mélanges de bétons autoplaçants en fonction de la fraction volumique des fibres de basalte (**Haido et al., 2020**)

- **Propriétés mécaniques**

Le changement de résistance à la compression n'est pas apparent avec une augmentation de la fraction volumique de fibres. (**Du et al., 2020 ; El-Gelani et al., 2018**).

(**Arslan, 2016**) ont aussi constaté qu'il n'y a pas d'effet significatif de la teneur en fibres (0,5, 1, 2 et 3 kg/m³) sur la résistance à la compression et que la résistance a augmenté pour tous les échantillons par rapport au béton de référence. Par contre (**Haido et al., 2020**) ont montrés que la résistance à la compression des fibres de basalte du béton auto-plaçant diminue considérablement et systématiquement en raison de l'utilisation d'une teneur en fibres de 0% à 1% avec un pourcentage de réduction de 22,4 % qui est attribué à l'allègement du poids du béton auto-plaçant avec l'introduction de fibres (**Figure II.19**). (**Chiadighikaobi, 2019**) ont conclu que dans le cas du béton léger renforcé de fibres de basalte d'argile expansée, la diminution de la résistance à la compression du béton est relativement minime.

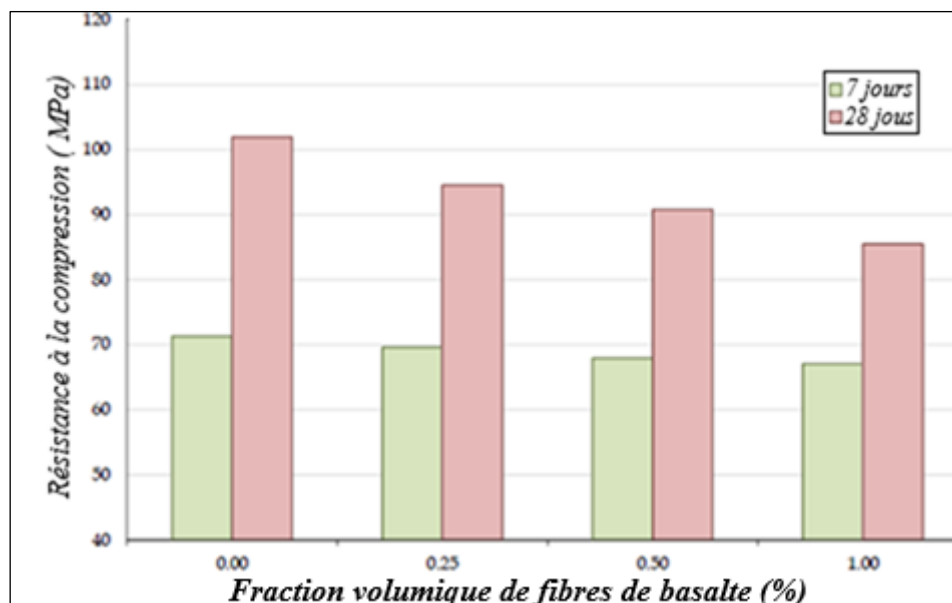


Figure II.19 : La résistance à la compression à 7 et 28 jours par rapport à la fraction volumique de fibres de basalte (**Haido et al., 2020**)

(**Arslan, 2016**) ont conclu que les fibres de basaltes ont augmenté la résistance à la traction par fendage (splitting tensile strength) des mélanges. (**Yakhlaf et al., 2015**) ont constaté aussi une amélioration significative de la résistance à la traction par fendage où l'augmentation de la teneur en fibres de basalte augmente la résistance de 5% à 33%.

Plusieurs chercheurs ont indiqué que les produits de basalte augmentaient la résistance à la flexion. La résistance à la flexion du béton auto-plaçant est améliorée grâce à l'utilisation de plus de 0,25 % de fibres de basalte (**Haido et al., 2020**). Le dosage des fibres de basalte n'a qu'un faible impact sur les valeurs maximales de la résistance à la flexion (**Jiao et al., 2019**). Et aussi, il n'y a pas d'effet significatif de la fibre de basalte sur le module d'élasticité du béton ordinaire (**Arslan, 2016**) ou auto-plaçant (**Haido et al., 2020**).

- **Durabilité**

(**Haido et al., 2020**) ont indiqué que les fissures précoces dues au retrait diminuent avec l'augmentation de la teneur en fibres, en particulier, avec l'utilisation de leur fraction volumique de 0,2 %, aucune fissuration n'a été observée.

(**Jiang et al., 2014**) ont mené des travaux expérimentaux pour estimer les propriétés mécaniques et la microstructure du béton renforcé de fibres de basalte hachées avec des teneurs entre 0,05 et 0,5 % du volume total du mélange. Les résultats du porosimètre à intrusion de mercure indiquent que la pâte contenant des fibres de basalte présente une porosité plus élevée.

II. 4 Valorisation des déchets végétaux issus des activités agroalimentaires

- **Propriétés du béton frais**

(Page et al., 2017) ont étudiés l'influence des fibres de lin sur les propriétés du béton frais en fonction de la longueur des fibres, la teneur en fibres ou encore la teneur en pâte, et ils ont conclu que l'incorporation de fibres de lin dans le béton a pour effet de réduire considérablement sa maniabilité à l'état frais, l'utilisation de fibres plus courtes (12 mm) permet de réduire cette influence néfaste sur l'ouvrabilité du béton frais.

L'augmentation des fibres de jute dans le béton a entraîné une diminution de la maniabilité du béton (Kalaivani et al., 2020 ; Bheel et al., 2021), cette diminution de l'ouvrabilité pourrait être liée à une augmentation de la surface spécifique du constituant et à une teneur élevée en fibres dans le béton, ce qui entraîne une augmentation des besoins en mortier de ciment pour couvrir leur surface. Ainsi, la quantité d'eau nécessaire pour assurer la maniabilité du béton renforcé de fibres a été réduite.

Les matériaux renforcés de fibres naturelles ont une importance signifiante pour la réduction de la densité des composants de construction en raison de leur rigidité spécifique plus élevée et de leur résistance à la traction spécifique (Prem Kumar et al., 2016).

Cette diminution de densité est due à la densité plus faible des fibres de jute par rapport aux autres composants du béton et à la quantité d'air la plus élevée dans le béton par les fibres que dans le mélange témoin (Bheel et al., 2021).

(Venkateshwaran & Kalaiyarrasi, 2018) ont remplacé (0.5 % 1% et 1.5 %) du volume de ciment par les fibres de sisal et ils ont conclu que l'augmentation du pourcentage de fibres de sisal diminue la maniabilité du béton composite.

Les propriétés d'ouvrabilité du béton frais renforcé de fibres de bambou contenant du latex de caoutchouc naturel étaient légèrement inférieures aux propriétés d'ouvrabilité du béton témoin frais (Figure II.20) (Althoey et al., 2022).

- **Propriétés mécaniques**

Avec l'augmentation de la teneur en fibres de lin, (Page et al., 2017) ont observés une augmentation de la résistance à la flexion, accompagnée d'une diminution de la résistance à la compression, des résistances à la flexion plus importantes sont obtenues pour les bétons incorporant les fibres les plus courtes (12 mm).

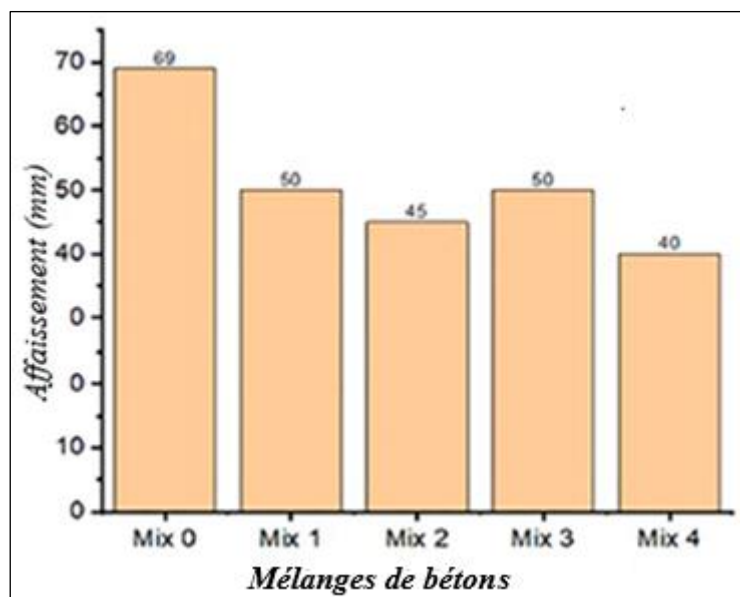


Figure II.20 : Valeurs d'essai d'affaissement pour les échantillons de béton renforcé de fibres de bambou (Althoey et al., 2022)

Les résistances à la compression, à la traction et à la flexion du béton de fibres de jute commencent à décliner une fois que le pourcentage de fibres dans le mélange de béton dépasse 1 % en raison de l'amélioration des espaces d'air et de la porosité, résultant d'un mauvais compactage d'un grand nombre de fibres dans le mélange de béton (Bheel et al., 2021).

(Guendouz et al., 2025) ont constaté que l'incorporation de différentes teneurs et longueurs de fibres de jute réduisait la résistance à la compression (Figure II.21).

(Kalaivani et al., 2020) ont conclu aussi que le béton renforcé de fibres de jute contenant 10 % d'agrégat de PET avec une fraction volumique de 0,25 % de fibre de jute s'avère optimal pour la compression et une fraction volumique de 0,5 % de fibre de jute est optimale pour la résistance à la traction par fendage et à la résistance à la flexion, ce qui signifie que l'inclusion d'agrégats de fibres de jute et de déchets plastiques améliorent l'efficacité globale du béton.

(Siva et al., 2019) ont indiqué que les stratifiés extérieurs en fibres de sisal présentent de meilleures propriétés mécaniques que les stratifiés extérieurs en fibres de bambou. D'après le test de flexion, le décollement de la fibre est plus important dans la fibre traitée que dans la fibre non traitée.

L'utilisation de la fibre de sisal naturel augmente la résistance du béton, le pourcentage optimal de fibre de sisal pour une résistance maximale était de 1 % pour la résistance à la compression et à la flexion et de l'ordre de 1,5 % pour celle à la traction (Venkateshwaran & Kalaiyarrasi, 2018).

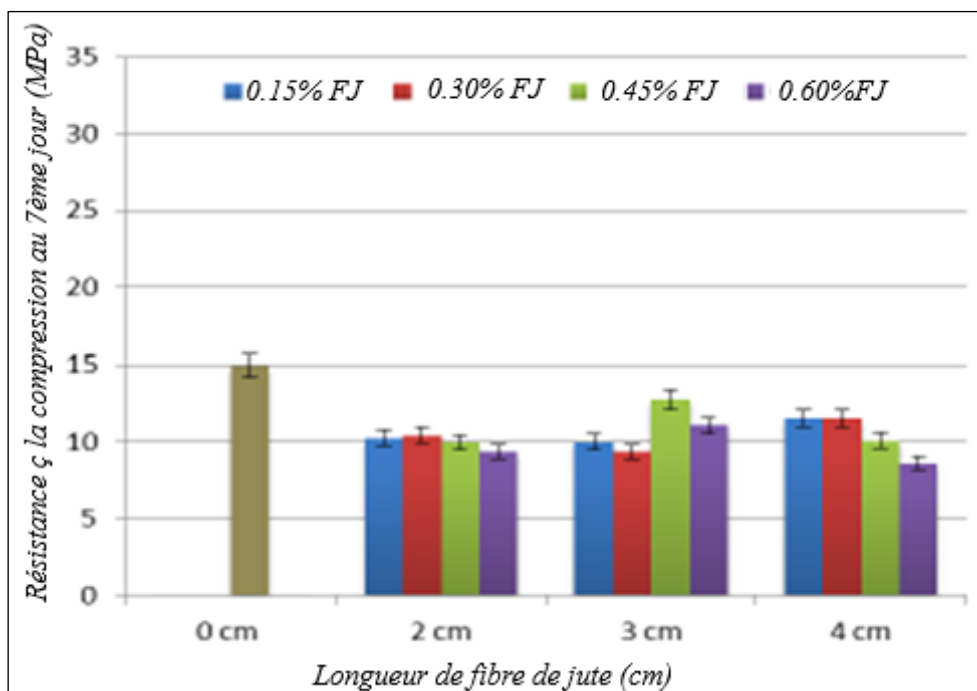


Figure II.21: Résistances à la compression des mélanges de béton de sable en fonction de la longueur et de la teneur en fibres de jute (Guendouz et al., 2025)

(Kumarasamy et al., 2020) ont ajouté des fibres de bambou au volume de béton à différentes teneurs (entre 0 %, et 2,5 %) et ont conclu que le béton renforcé de fibres de bambou avec un ajout de fibres jusqu'à 2 %, offre une résistance supplémentaire par rapport au béton conventionnel.

- **Durabilité**

(Page et al., 2017) ont indiqué que la porosité du béton renforcé avec des fibres de lin augmente avec la teneur en fibres. La compacité granulaire est fortement réduite avec l'ajout de fibres de lin.

L'augmentation de la teneur en fibres de jute entraîne une diminution du retrait de séchage en raison de sa nature hydrophile, il absorbe l'eau au stade précoce et libère de l'eau et se rétracte à mesure que le béton durcit. (Nambiar & Haridharan, 2021)

(Iniya & Nirmalkumar, 2021) ont conclu qu'il y avait une ductilité plus élevée dans la fracturation des échantillons utilisant des fibres de sisal, donc, l'ajout de fibres naturelles au béton pouvait mieux contrôler la fissuration du béton.

L'ajout de fibre de bambou a notamment amélioré la ductilité des produits de composites cimentaires végétaux et que ces fibres peuvent réduire la largeur des fissures et les défauts massifs et augmenter aussi la capacité à supporter des charges externes.

II. 5 Valorisation des déchets de démolition

Dans cette partie, le comportement du béton à base de divers déchets de construction et de démolition sera présenté. L'agrégat recyclé est censé représenter un agrégat naturel, qui contient des impuretés telles que la brique, le bois, la céramique, l'asphalte et d'autres matériaux (De Brito & Saikia, 2013).

- **Propriétés du béton frais**

La maniabilité du béton frais est une propriété très importante, qui contrôle diverses autres propriétés du béton à l'état frais et durci, telles que la densité, la teneur en air et la résistance. La maniabilité du béton dépend de diverses propriétés de ses constituants. La performance de l'ouvrabilité du béton contenant des agrégats de déchets de construction et de démolition a été étudiée de manière approfondie par plusieurs chercheurs, car diverses propriétés des agrégats de déchets de construction et de démolition, qui contrôlent l'ouvrabilité du béton, ne correspondent pas à celles de l'agrégat normal (De Brito & Saikia, 2013).

L'affaissement du béton contenant des agrégats de construction et de démolition doit être inférieur à celui du béton conventionnel en raison de la capacité d'absorption d'eau plus élevée des agrégats de construction et de démolition que celle des agrégats naturels (De Brito & Saikia, 2013). La texture de la surface et l'angularité des agrégats de construction et de démolition ont également une influence considérable sur les performances mécaniques et de mise en œuvre du béton. (Buyle-Bodin & Zaharieva, 2002)

L'absorption d'eau des granulats recyclés augmente avec l'augmentation de la résistance du béton de base à partir duquel les granulats recyclés sont dérivés, tandis qu'elle diminue avec l'augmentation de la taille maximale des granulats, la valeur d'absorption d'eau de 10% de l'agrégat de déchets de construction et de démolition satisfaisait à la performance de mise en œuvre souhaitable du béton contenant ce type d'agrégat (Padmini et al., 2009).

La densité du béton frais contenant des agrégats de déchets de construction et de démolition est légèrement inférieure à celle du mélange contenant des agrégats naturels, car la densité de cet agrégat de déchets de construction et de démolition est inférieure à celle des agrégats naturels (De Brito & Saikia, 2013).

Les résultats de la masse volumique de béton frais (Figure II.22) ont montré une tendance décroissante dans les mélanges préparés avec des agrégats de béton grossier recyclés pré-

saturés avec des taux d'incorporation de 20% et 50%. La différence pour les mélanges préparés avec compensation de l'eau a augmenté pour des taux d'incorporation plus élevés d'agrégats de bétons grossiers recyclés (Ferreira et al., 2011).

(Li et al., 2009) ont observé que les résultats du test d'affaissement montrent que la maniabilité satisfaisante du béton de granulats recyclés peut être obtenue en utilisant la technique de revêtement avec de la poudre pouzzolanique (où les granulats recyclés sont **enrobés** avec une fine couche de poudre pouzzolanique). Cette technique est économique et n'entraîne pas de grandes modifications du procédé de production du béton d'agrégats recyclés.

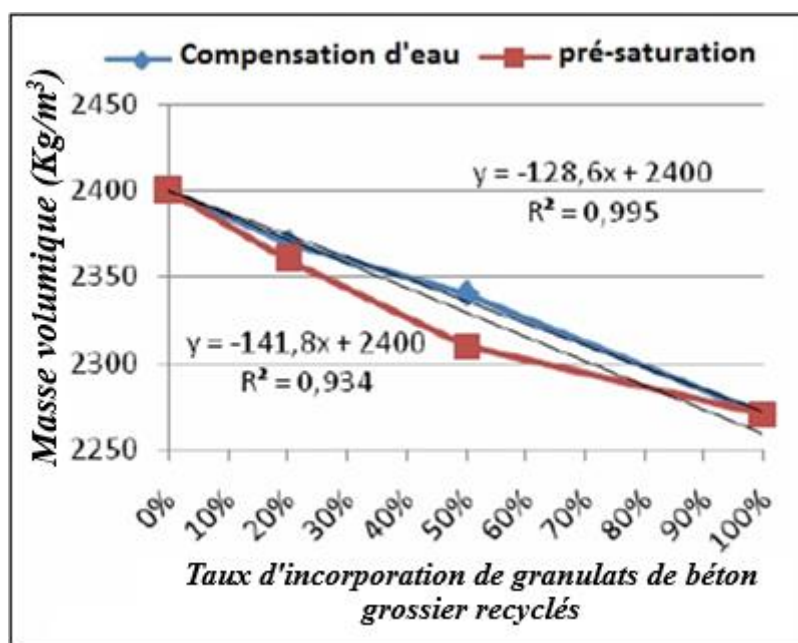


Figure II.22: Densité du béton frais / Ratio d'incorporation des agrégats de béton grossier recyclés (Ferreira et al., 2011)

- **Propriétés mécaniques**

La réduction de la résistance à la compression due à l'ajout d'agrégats de déchets de construction et de démolition peut être contrôlée en modifiant divers facteurs du mélange de béton, tels que l'ajustement du rapport E / C, le traitement de l'agrégat et l'utilisation des ajouts minéraux. Les informations réunies jusqu'à présent sur l'utilisation d'agrégats de déchets de démolition dans le béton montrent que les modifications apportées à la procédure de mélange du béton constituent l'étape clé pour obtenir un béton de bonne qualité contenant tout type d'agrégat de déchets de construction et de démolition (De Brito & Saikia, 2013).

(Minhaj et al., 2018) ont montré que l'augmentation de la résistance à la compression du béton de granulats ordinaires et recyclés avec une augmentation du dosage de fibres synthétiques. Par exemple, une augmentation de 5% de la résistance à la compression du béton normal renforcé de fibres a été observée avec un dosage de 1% de fibres synthétiques. De même, la résistance à la compression est passée de 38,6 MPa à 41,6 MPa pour un dosage de 1% de fibres synthétiques dans du béton de granulats recyclés.

(Ferreira et al., 2011) ont rapporté que les mélanges préparés avec des agrégats de béton grossier recyclés et pré-saturés présentaient une résistance à la compression inférieure à celle des mélanges préparés avec compensation en eau. Cela était probablement dû à un « effet de clouage » plus faible, résultant de la pénétration de la pâte de ciment dans les pores superficiels des agrégats. (Figure II.23).

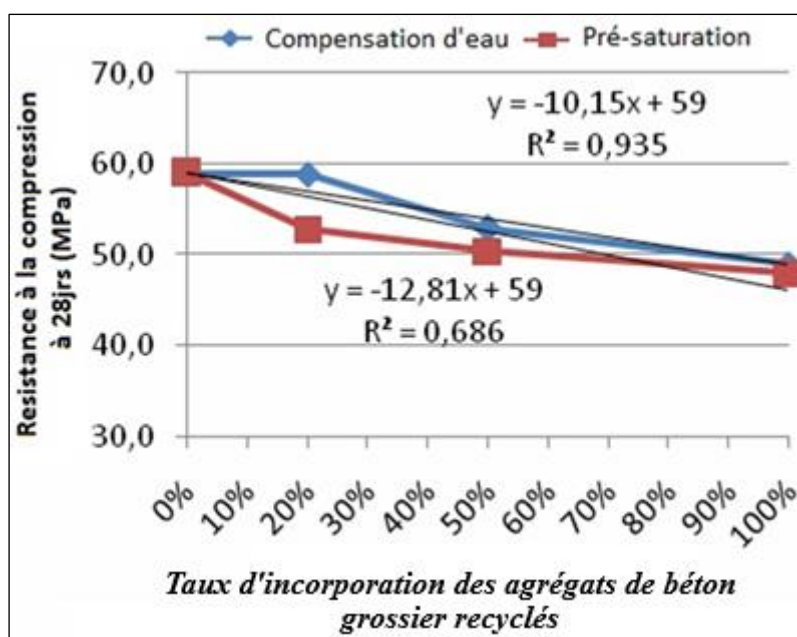


Figure II.23: Résistances à la compression à 28 jours par rapport au taux d'incorporation d'agrégats de béton grossiers recyclés (Ferreira et al., 2011)

(Padmini et al., 2009) ont observé que le béton de granulats recyclés nécessite un rapport E-C relativement plus faible et une teneur en ciment plus élevée par rapport au béton de base pour obtenir une résistance à la compression particulière. La différence de résistance entre le béton de référence et le béton d'agrégat recyclé augmente avec l'âge du béton.

(Batayneh et al., 2007) ont constaté une réduction de la résistance à la compression avec un substitut à 20% de béton concassé recyclé d'environ 13 %, ce qui pourrait être considéré comme acceptable tant qu'il est pris en compte dans la phase de conception. (Figure II.24).

La teneur en agrégats de béton recyclé a largement affecté la résistance à la compression du béton. Les résultats indiquent une tendance à la baisse de la résistance à la compression vers le haut niveau de la teneur en agrégats de béton recyclé. La relation inverse entre la teneur en agrégats de béton recyclé et la résistance à la compression est due à la mauvaise qualité du mortier collé qui a subi le processus de concassage engendrant des zones poreuse dans le béton (Kwan et al., 2012).

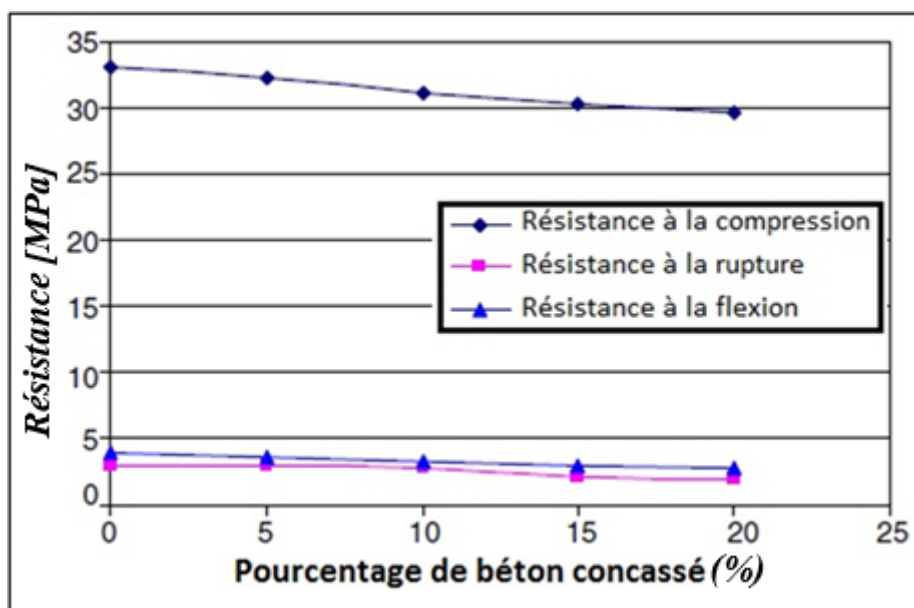


Figure II.24: Relation entre la résistance à la compression et le pourcentage de teneur en agrégats de béton concassé (Batayneh et al., 2007)

La résistance à la rupture par traction du béton contenant des agrégats de béton recyclé est nettement inférieure à celle du béton conventionnel, ce qui diminue encore l'ajout d'agrégats de déchets de construction et de démolition au béton (De Brito & Saikia, 2013).

De la même manière que la résistance à la compression et la résistance à la rupture par traction, l'ajout d'agrégats de déchets de construction et de démolition dans le béton diminue la résistance à la flexion. Cependant, dans plusieurs études, il a été rapporté que ces ajouts ne réduisent pas la résistance à la flexion aussi sensiblement que la résistance à la compression. La variation de résistance à la flexion entre le béton conventionnel et le béton contenant des agrégats de déchets de construction et de démolition était négligeable dans certaines études et inférieure à 30% dans d'autres, en fonction des variations de différents facteurs (De Brito & Saikia, 2013).

La diminution de la résistance à la flexion a été constatée avec l'augmentation du taux de remplacement des agrégats grossiers recyclés. Pour ce cas, et avec un taux de remplacement de 100% des agrégats grossiers recyclés, les études ont montré une chute de 23% de la résistance à la flexion du béton (Minhaj et al., 2018).

(Shaikh & Nguyen, 2013) ont montré aussi que le béton contenant 25% d'agrégats grossiers recyclés a maintenu sa résistance à la flexion que celle du béton à agrégats naturels. Toutefois, des résultats mitigés sont observés dans le béton de granulats recyclés contenant 50% de granulats grossiers recyclés. (Figure II.25).

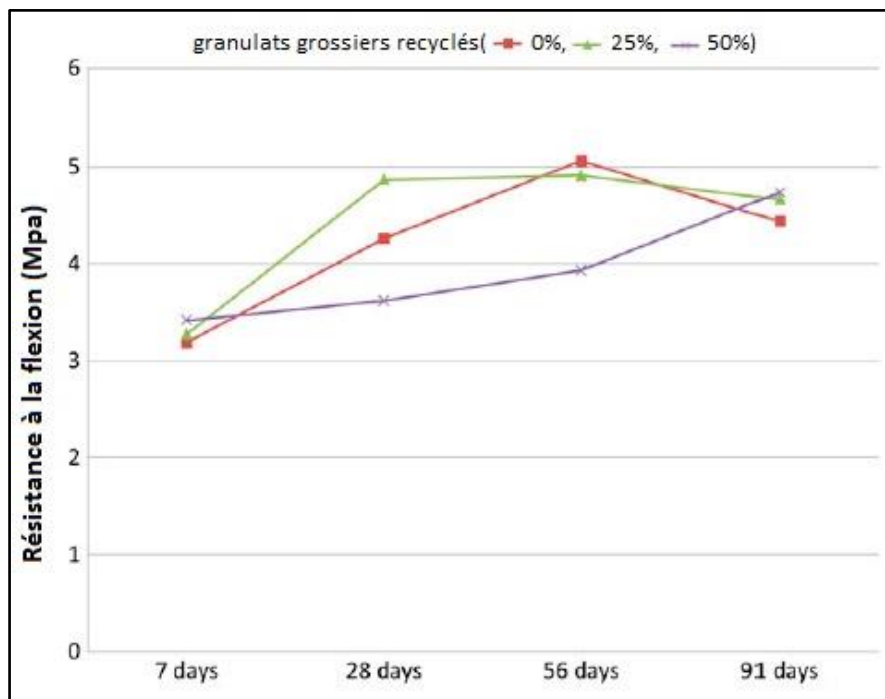


Figure II.25: Résistance à la flexion des bétons de granulats recyclés (Shaikh & Nguyen, 2013)

De manière similaire aux propriétés de résistances, le module d'élasticité d'un béton contenant un agrégat de déchets de construction et de démolition est normalement inférieur à celui d'un béton conventionnel et diminue en fonction de la teneur en agrégats recyclés (De Brito & Saikia, 2013).

Le module d'élasticité du béton varie de manière significative avec la rigidité des gros granulats. La réduction du module d'élasticité du béton fabriqué avec un agrégat de béton recyclé traité est limitée à 10% seulement lorsque les agrégats naturels grossiers ont été complètement remplacés par un agrégat de béton recyclé traité. Ceci peut être comparé à la

réduction de 25% du module d'élasticité lorsque les agrégats naturels ont été remplacés par des agrégats de béton recyclé non traité (Akbarnezhad et al., 2011).

- **Durabilité**

(De Brito & Saikia, 2013) On déduit que l'incorporation de déchets de construction et de démolition comme agrégats dans le béton a été identifiée comme la principale raison de l'augmentation du retrait de séchage du béton.

D'après (Kwan et al., 2012), la perméabilité intrinsèque des éprouvettes augmente avec l'augmentation du niveau de remplacement des granulats grossiers recyclés et diminue avec l'âge du béton ou la période de durcissement. D'après leurs résultats, ils ont montré qu'à mesure que l'âge de béton, les différences marginales de la perméabilité intrinsèque entre le béton normal et le niveau de remplacement élevé du granulats grossiers recyclés diminuent. La diminution de la perméabilité intrinsèque est due à la poursuite du processus d'hydratation dans la matrice cimentaire.

(Shaikh & Nguyen, 2013) ont noté que l'absorption d'eau pour les bétons contenant des déchets de bétons recyclés augmente avec l'augmentation de la teneur en déchets à tous les âges. Cela est dû à l'absorption plus élevée d'eau par les déchets de béton et à l'adhérence des mortiers et granulats grossiers qui sont généralement plus poreux que le granulats naturel. (Kwan et al., 2012) ont également observé que le niveau d'absorption d'eau est considéré comme faible lorsqu'il est inférieur à 3 %. Par conséquent, seul le béton ordinaire et le béton à gros granulats recyclés avec une teneur inférieure à 30% pourraient être classés comme béton à faible absorption d'eau. La valeur d'absorption la plus élevée est atteinte par des échantillons de granulats grossiers recyclés à 80 %, ce qui est 2,2 fois supérieur à celui du cas de référence.

II. 6 Conclusion

L'incorporation de divers types de déchets dans la composition du béton peut contribuer à résoudre plusieurs problèmes écologiques et environnementaux. Les effets de l'incorporation des débris recyclés industriels (tels que la céramique, le plastique, le caoutchouc, le verre, le basalte, végétaux et de construction et de démolition) - sur les propriétés du béton à l'état frais, ses propriétés mécaniques et sa durabilité ont été présentés dans ce chapitre.

Les résultats de béton frais indiquent que le remplacement des agrégats naturels ou l'ajout de déchets recyclés dans la composition de béton affecte significativement l'affaissement, la maniabilité, l'ouvrabilité et la durabilité, chaque type de déchet affecte différemment les propriétés à l'état frais du béton, selon le type, la forme et le dosage.

Concernant les propriétés mécaniques, les résultats ont montré que ces caractéristiques dépendent de la nature physique et chimique des déchets utilisés. Certains déchets comme le plastique, ou le caoutchouc entraîne une diminution des propriétés mécaniques et une baisse durabilité. D'autres déchets comme le verre et le basalte, les fibres végétales peuvent améliorer les performances mécaniques. Le chapitre suivant s'intéresse à une synthèse sur les principaux modèles d'endommagement du béton ainsi qu'aux méthodes numériques, adoptées dans cette thèse pour l'analyse du comportement des composites cimentaires valorisés.

Chapitre III

Synthèse sur les Modèles d'Endommagement des Bétons

« Les modèles doivent être aussi simples que possible, mais pas plus simples »

Albert Einstein

III.1 Introduction

Le béton est un matériau quasi-fragile, les propriétés mécaniques et de rupture de ce matériau telles que la ténacité, l'énergie de rupture, etc., sont fortement affectées par la topologie des éprouvettes testées. Le comportement du béton à l'échelle du laboratoire est quasi-fragile et parfaitement fragile à l'échelle des ouvrages. Les variations des réponses des matériaux en termes de changements géométriques de la structure sont appelées l'effet d'échelle ou l'effet de taille. Le problème majeur concerne l'effet d'échelle de la structure sur sa résistance et son comportement à la rupture.

Le béton est un matériau constitué de granulats, de pâte cimentaire et d'une zone de transition entre ces deux éléments. Lors d'une sollicitation, la fissuration s'accompagne d'interactions entre les éléments, entraînant des redistributions de certaines caractéristiques cinématiques et statiques dans la région de la fissure (Fracture Process Zone) (**FPZ**). Cette partie de la structure, qui représente la zone de dissipation d'énergie, est située à l'extrémité de la fissure permettant de libérer une quantité d'énergie à chaque phase de chargement, entraînant une redistribution des contraintes au sein de la structure ou l'élément. Le mécanisme de l'effet de taille est essentiellement déterministe et comprend la redistribution des contraintes ainsi que la libération d'énergie accumulée résultante d'une grande fracture ou d'une **FPZ** importante.

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté les propriétés mécaniques du béton aux états frais et durcis, ce qui nous a permis d'aborder dans ce chapitre, les phénomènes d'endommagement des bétons, ainsi que les aspects fondamentaux à la compréhension du comportement à la rupture des structures. Après avoir exposé les concepts théoriques et les modèles développés dans la littérature pour décrire l'endommagement des matériaux quasi-

fragiles, nous présenterons les approches numériques retenues pour ce présent travail de recherche.

III. 2 Effet d'échelle sur la résistance des structures en béton

III.2.1 Théories de l'effet d'échelle

Plusieurs critères ont été proposés pour expliquer les effets d'échelle dans les structures en béton, les théories sont principalement divisées en trois catégories.

- La théorie statistique de la distribution aléatoire de la résistance.
- La théorie fractale de la fissure.
- La théorie déterministe de Bazant.

- **La théorie statistique de la distribution aléatoire de la résistance :**

La théorie statistique de l'effet d'échelle a commencé à émerger après que le modèle du maillon le plus faible appliqué à une chaîne a été formulé et que les statistiques des valeurs extrêmes développées par différents chercheurs ont été introduites. Les premiers fondements de cette théorie ont été posés par Weibull (ALAM, 2011). Weibull a étudié statistiquement l'effet de taille dans la contrainte nominale critique, comme il a suggéré une probabilité de rupture de loi de puissance appelée effet de taille statistique. Connue aussi sous le nom de **modèle du maillon** qui prédit une diminution de la résistance avec l'augmentation du volume de la structure (Aissaoui, 2018). Une généralisation tridimensionnelle continue du **modèle du maillon** est généralisée pour la rupture d'une chaîne de maillons de force aléatoire, conduisant à la distribution (Weibull).

$$P(\sigma_N) = 1 - \exp\left[-\int c[\sigma(x), \sigma_N] dV(x)\right]$$

Où P , représente la probabilité pour qu'une structure rompe avec une contrainte nominale σ_N dès que la fissure macroscopique se s'amorce à partir d'une microfissure ou d'un défaut quelque part dans la structure, σ est le champ de contraintes juste avant la rupture, V représente le volume de la structure et $c(\sigma)$ est la fonction donnant la répartition spatiale de la probabilité de rupture du matériau.

Les limites de l'utilisation de cette théorie ont été présentées par quelques chercheurs. Dont (Aissaoui, 2018) qui a mentionné que la validité de la théorie de Weibull est limitée aux structures à rupture fragile qui sont caractérisées par la présence d'une petite taille de la FPZ concentrée à la pointe de la fissure, causant une redistribution de contrainte négligeable à l'échelle globale.

- **La théorie fractale de la fissure :**

Les nouvelles tendances de la mécanique de la rupture ont montré une forte corrélation entre la topologie des défauts et l'énergie de rupture des matériaux en béton (**Alam, 2011**). (**Carpinteri, 1989**) a proposé un critère d'effet d'échelle pour les échantillons non entaillés en utilisant le théorème de (**Mandellbort, 1982**).

La théorie de l'effet de taille est proposée par (**Carpinteri, 1994**) appelée loi d'échelle multi-fractale (**MFSL**) montrant qu'une nature fractale peut être à l'origine physique des effets de taille observés sur les structures en béton. Pour les endommagements se produisant au début de la rupture à partir d'une surface lisse.

La loi d'effet d'échelle proposée par **Carpinteri** s'exprime comme suit :

$$\frac{f_t}{f_t'} = \beta \sqrt{1 + \frac{l_m}{D}}$$

Avec :

f_t représente la résistance nominale à la traction du matériau,

f_t' résistance de référence à la traction,

D taille de la structure,

L_m longueur caractéristique qui dépend du matériau et de la géométrie,

β paramètre de la loi.

- **La théorie déterministe de Bažant :**

La première étude déterministe sur l'effet taille a été réalisée par (**Leicester, 1969**). Il a affirmé que l'effet de la taille sur la résistance des matériaux est dû à deux concepts : hétérogénéité du matériau et existence de défauts de géométrie comme les fissures, les entailles, etc. Il a expliqué que la région inélastique locale joue un rôle majeur dans la rupture des bétons.

En 1976, (**Bažant, 1976**) a démontré analytiquement que la localisation des contraintes engendre un effet d'échelle sur la résistance maximale et sur la dissipation d'énergie Post-Pic des structures. Il supposait que pour les matériaux quasi-fragiles, une bande de fissures est générée devant sa pointe et que la rupture aura lieu lorsque cette zone se propage, causant la libération de l'énergie.

Selon Bažant, l'énergie libérée est dépendante de la longueur de fissure et de l'aire de la zone de rupture. A l'aide d'une analyse de libération d'énergie approximative, un critère d'effet d'échelle (Size Effect Law (**SEL**)), est proposé pour montrer l'effet de taille dans les structures fissurées avec des entailles ou des fissures, est donnée par :

$$\sigma_N = B f_t' \left(1 + \frac{D}{D_0}\right)^{-\frac{1}{2}}$$

Avec σ_N est la contrainte nominale,

D est la taille caractéristique de la structure,

B et D_0 sont des constantes empiriques qui peuvent être déterminées par calibration des résultats expérimentaux pour des éléments géométriquement similaires pour différentes tailles, ces deux paramètres dépendent de la géométrie de structure,

f_t' est la résistance à la traction du matériau.

L'application de la loi d'effet d'échelle de Bažant pour prédire l'effet de taille sur la résistance maximale des poutres en béton a été vérifiée expérimentalement. Parmi ces travaux expérimentaux, les essais de **Walsh** sur les poutres en béton entaillées. (**ALAM, 2011**)

Il existe deux comportements asymptotiques de la loi d'effet d'échelle : la théorie de résistance basée sur le critère de résistance (plasticité, analyse limite) et la mécanique linéaire de la rupture (**MLER** ou **LEFM**). Le point d'intersection entre ces deux comportements est représenté par une constante proportionnelle à la géométrie D_0 , connue sous le nom de taille de transition (**Figure III.1**).

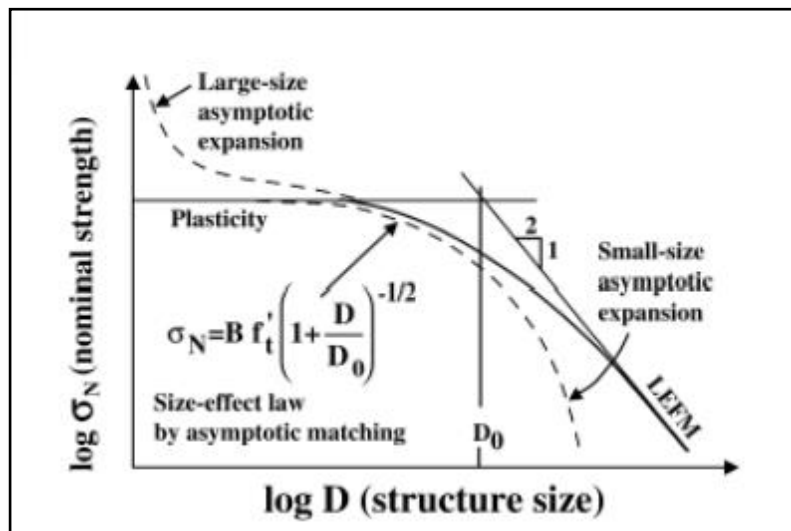


Figure III.1 : Loi d'effet d'échelle énergétique pour des structures quasi-fragiles entaillées (**Bažant, 2005**)

Pour le cas de petites tailles ($D < D_0$), cette loi se réduit à $\sigma_N = \text{constante}$, ce qui correspond à l'asymptote horizontale et signifie que le comportement est prévu d'être ductile induisant un effet d'échelle négligeable. Pour les grandes tailles ($D > D_0$), la loi prévoit un effet d'échelle décrit par la mécanique linéaire de la rupture (**MLER**) et la contrainte nominale σ_N est inversement proportionnelle à la racine carrée de la taille des structures (**Aissaoui, 2018**).

III.2.2 Effet d'échelle sur l'énergie de rupture

De nombreux modèles numériques permettent de calculer l'énergie de rupture comme propriété du matériau. Trois de ces modèles ont été adoptés par le RILEM (Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages) pour déterminer expérimentalement l'énergie de rupture : le modèle de fissure fictive, le modèle à deux paramètres et le modèle à effet d'échelle. (ALAM, 2011)

Dans le modèle de fissure fictive, l'énergie de rupture pour un échantillon où la hauteur et la longueur initiale d'entaille sont définies et calculées comme l'aire sous le diagramme d'adoucissement en traction ou de contrainte cohésive-ouverture de fissure. Cette définition de l'énergie de rupture donnerait des valeurs différentes si l'on changeait le rapport longueur/taille de l'entaille. (Van Mier, 2012) a déclaré qu'une chute progressive de la charge Post-Pic est généralement observée lors de l'essai d'éprouvettes de dimensions finies, mais qu'il est très peu probable qu'elle se produise pour les fissures dans des plaques infinies. Par conséquent, le diagramme d'ouverture de fissure sous contrainte cohésive doit être considéré comme le résultat du chargement d'une structure spécifique pour des conditions aux limites spécifiques.

La loi d'effet d'échelle proposée par (Bažant, 1984) est basée sur l'hypothèse que la taille de la (FPZ) et l'énergie de rupture sont indépendantes de la taille et de la géométrie de la structure. Bažant a supposé que la taille de la (FPZ) n'est pas négligeable et pour la rupture des éprouvettes de laboratoire. La zone de processus de rupture est du même ordre de grandeur que la taille de l'éprouvette. En raison de la plasticité limitée du béton sous des charges de traction, il a également supposé que la zone non linéaire de durcissement entourant la zone de processus de rupture soit plutôt petite et que la limite de cette zone non linéaire se trouve très près de la limite de la zone de processus de rupture (FPZ).

III.3 Théories et approches d'endommagement du béton

Le béton présente une structure granulaire multi-échelles complexe, ce qui en fait un matériau hiérarchique. En raison de la distribution aléatoire de ses différentes phases à des échelles allant du méso aux macros, le béton présente des caractéristiques mécaniques qui ne suivent pas une ligne droite et une hétérogénéité inhérente. Les processus de rupture de ce matériau se manifestent à diverses échelles et sont étroitement interconnectés. Par conséquent, avant d'opter pour un modèle capable de simuler le comportement mécanique du béton, il est essentiel de donner une attention particulière au choix de l'échelle de modélisation, afin de

représenter de manière précise les divers mécanismes d'endommagement de ce matériau dans différentes conditions de chargement.

(ALAM, 2011) a souligné l'importance des différentes échelles dans l'observation du béton, et comment elles influent sur ses propriétés et comportements, de la taille des particules élémentaires jusqu'aux dimensions des bâtiments et des structures (**Figure III.2**).

À l'échelle nanométrique (10^{-9} m) : On observe les éléments de base du béton, tels que le ciment et les granulats, révélant ainsi leur forme atomique.

À l'échelle micrométrique (10^{-6} m) : On identifie les produits hydratés du ciment, comme le silicate de calcium hydraté, mettant en évidence la structure poreuse complexe du matériau.

À l'échelle mésoscopique (10^{-3} m) : À ce niveau, le béton est considéré comme une matrice avec des granulats. Les vides internes et les défauts, tels que les fissures et les pores, ont un impact significatif sur le comportement mécanique du béton.

À l'échelle macroscopique (de cm à m) : Des essais mécaniques à l'échelle du laboratoire mettent l'accent sur la réponse mécanique globale, en supposant des propriétés isotropes pour le matériau.

À l'échelle des bâtiments et des structures de génie civil (10^{+3} m et plus) : À ces échelles plus vastes, le matériau est généralement modélisé comme un milieu continu. Cependant, des détails de la structure interne peuvent être identifiés, surtout en présence d'un renforcement en armatures d'acier.

Dans le domaine de la science des matériaux appliquée aux structures en béton, la recherche se focalise principalement sur trois niveaux d'observation : le micro-échelle, le méso-échelle et le macro-échelle, pour la modélisation des structures entaillées.

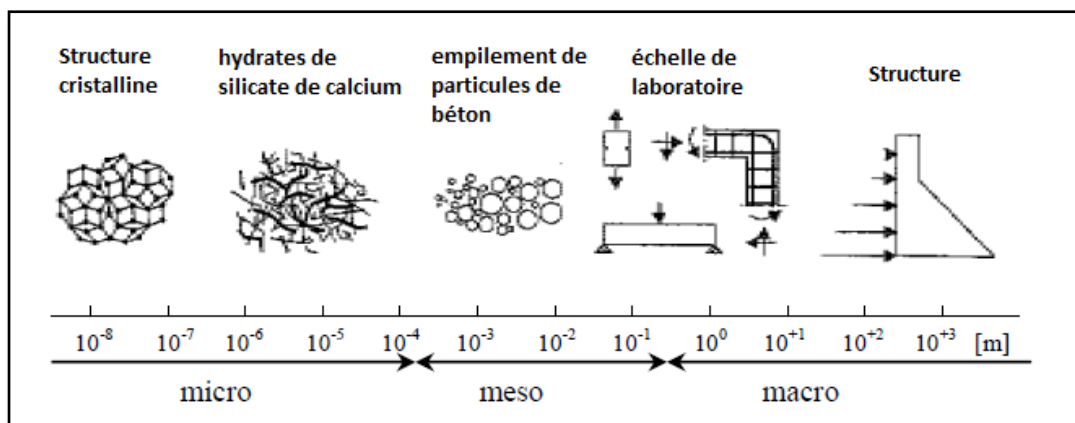


Figure III.2 : Diverses échelles de modélisation du matériau béton, de la structure atomique à la construction à grande échelle (Alam, 2011)

Le choix d'une échelle de modélisation appropriée pour le béton dépend de l'échelle d'observation, des caractéristiques de réponse, du niveau de précision recherché ainsi que du coût de calcul associé. (Van Mier, 2012) a mis en évidence l'importance cruciale des approches multi-échelles pour approfondir la compréhension des propriétés mécaniques et de rupture. Néanmoins, malgré leur pertinence, la question du coût computationnel représente un défi majeur à surmonter dans la mise en œuvre de ces approches.

Le béton est étudié à différentes échelles d'observation, à l'échelle microscopique, le béton est représenté comme une matrice de ciment durci qui présente elle-même une forte hétérogénéité. Cette échelle permet de fournir des informations sur les aspects micromécaniques des divers phénomènes de dégradation qui interagissent dans la matrice de ciment. À l'échelle macroscopique, le béton est considéré comme homogène, la modélisation macroscopique requiert l'utilisation d'un grand nombre de paramètres pour décrire adéquatement la complexité du comportement du matériau béton. La modélisation à l'échelle mésoscopique se situe entre l'approche macro, qui nécessite l'utilisation d'un volume élémentaire représentatif, et l'approche micro, qui se focalise sur l'étude des aspects micromécaniques dans la matrice cimentaire.

L'analyse du comportement du béton implique une étude approfondie de la manière dont ce matériau réagit sous diverses charges, déformations et conditions environnementales. Cette étude peut être abordée à travers deux théories principales : la théorie de l'endommagement, couplée ou non à la plasticité, et la théorie de la mécanique de la rupture. Ces théories offrent des perspectives cruciales pour comprendre les mécanismes d'endommagement et de rupture des bétons, ainsi que pour prédire leur réponse dans des situations réelles.

III.3.1 Théorie de l'endommagement et de la plasticité

La mécanique de la rupture permet d'expliquer la dégradation progressive de l'intégrité d'un matériau résultant de la propagation des microfissures, des micro-vides et d'autres défauts structuraux. Ces altérations au niveau micro-structurel engendrent une diminution de la rigidité à l'échelle macroscopique. La fusion des défauts peut aboutir à la formation de fissures macroscopiques, accompagnées de zones de déformation concentrée à leurs extrémités. La propagation des fissures dépend en grande partie de ces zones. Au-delà d'un certain seuil de sollicitation, le béton subit une déformation inélastique, marquée par l'activation presque uniforme des microfissures, induisant des déformations permanentes qui empêchent un retour à l'état initial après déchargement.

(Aissaoui, 2018) a mentionné des équations gouvernant la dégradation de la rigidité des bétons en utilisant des variables d'endommagement pour décrire les fissures et les micro-défauts. Elle a proposé une loi de comportement d'endommagement sous la forme d'un tenseur de rigidité C_{ij} dépendant de l'état d'endommagement décrit par la variable D^* . L'indice (*) désigne le type de la variable (ordre 0, 1, 2, 4 !).

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl}$$

$$C_{ijkl} = (C_{pqrs}^0, D^*)$$

L'évolution de l'endommagement a été évoquée en utilisant une loi normale similaire à celle utilisée à la plasticité.

Les modèles d'endommagement ne sont pas suffisants pour expliquer complètement la dégradation du béton. En effet, cette dégradation est liée à l'apparition d'une irréversibilité de l'état mécanique, notamment en raison des variables cinématiques. Cependant, en plus des considérations physiques, certaines théories sont bien adaptées pour décrire mathématiquement ces phénomènes irréversibles. Pour le béton, les expériences démontrent que, au-delà d'un certain niveau de sollicitation, des déformations permanentes surviennent. La plasticité est un outil bien adapté pour décrire ces déformations permanentes.

(Aissaoui, 2018) a également mentionné le couplage possible entre l'endommagement et la plasticité, soulignant son importance pour comprendre la dégradation du matériau. Son travail a mis en évidence l'importance de ces considérations pour prédire le comportement du béton sous différentes conditions de chargement et de déformation.

La loi de comportement plastique générale peut être exprimée comme suit :

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} (\varepsilon_{kl} - \varepsilon_{kl}^p)$$

ε_{kl}^p Représente le tenseur des déformations plastiques.

Le couplage de l'endommagement et de la plasticité est décrit par :

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl}^D (\varepsilon_{kl} - \varepsilon_{kl}^p)$$

Où C_{ijkl}^D est le tenseur d'élasticité endommagé. Le produit de la partie élastique de ce tenseur par la composante $(\varepsilon_{kl} - \varepsilon_{kl}^p)$ représente la contrainte effective. Un couplage explicite ou implicite peut être adopté. La résolution numérique est souvent réalisée en deux étapes en plasticité à endommagement constant.

III.3.2 Théorie de la mécanique de la rupture

La théorie de la mécanique de la rupture est une approche conçue pour étudier la dégradation et la rupture des matériaux. L'objectif principal de cette approche est d'analyser la propagation des fissures des défauts qui apparaissent dans les matériaux et qui entraînent ainsi la rupture. Cette théorie est adoptée pour prédire les conditions de rupture du matériau et déterminer sa résistance en présence de défauts. La mécanique de la rupture examine l'interaction entre les discontinuités géométriques, le milieu environnant continu et la propagation des fissures.

Dans un matériau fissuré, trois zones distinctes peuvent être identifiées autour de la pointe de la fissure. La première zone, située immédiatement près de la pointe de la fissure, présente des contraintes tendant vers l'infini et est qualifiée de zone discontinue. La deuxième zone, appelée zone singulière, présente des champs de contraintes, de déplacements et de déformations continus, avec une singularité en fonction de la distance à la pointe de la fissure. Enfin, la dernière zone, appelée zone éloignée, assure la transition entre la zone singulière et les conditions aux limites. La mécanique de la rupture est cruciale pour comprendre le comportement des matériaux fissurés et prédire leur rupture dans diverses conditions de chargement.

Lorsque l'on suppose un comportement de matériau élastique linéaire, cela aboutit à des contraintes infinies à la pointe de fissure. Cependant, en réalité, cette situation est bien évidemment impossible, car une déformation plastique se produit dans la région de la pointe de fissure pour éviter ces contraintes infinies. Cette déformation plastique permet d'atténuer les concentrations de contraintes et de rendre compte du comportement réel du matériau près de la fissure. Ainsi, la prise en compte de la déformation plastique est essentielle pour une modélisation réaliste du comportement des matériaux fissurés. Deux approches principales sont disponibles pour étudier la zone singulière près de la fissure : l'approche locale et l'approche globale énergétique. L'approche locale se concentre sur l'analyse détaillée des champs de contraintes et de déformations à proximité immédiate du front de fissure. En revanche, l'approche globale énergétique examine le comportement global d'une structure fissurée en prenant en compte les échanges d'énergie qui se produisent. Ces deux approches complémentaires fournissent des informations essentielles sur le comportement du matériau près de la fissure et sur les mécanismes de propagation de la rupture.

- **Approche locale**

La mécanique de la rupture explore trois modes de rupture distincts (**Figure III.3**) :

- Mode I, qui représente l'ouverture de la fissure avec des déplacements perpendiculaires à la direction de propagation. C'est le mode le plus critique, où les liaisons atomiques à la pointe de la fissure subissent une sur-tension.
- Mode II et Mode III, correspondant respectivement au cisaillement dans le plan et hors du plan.

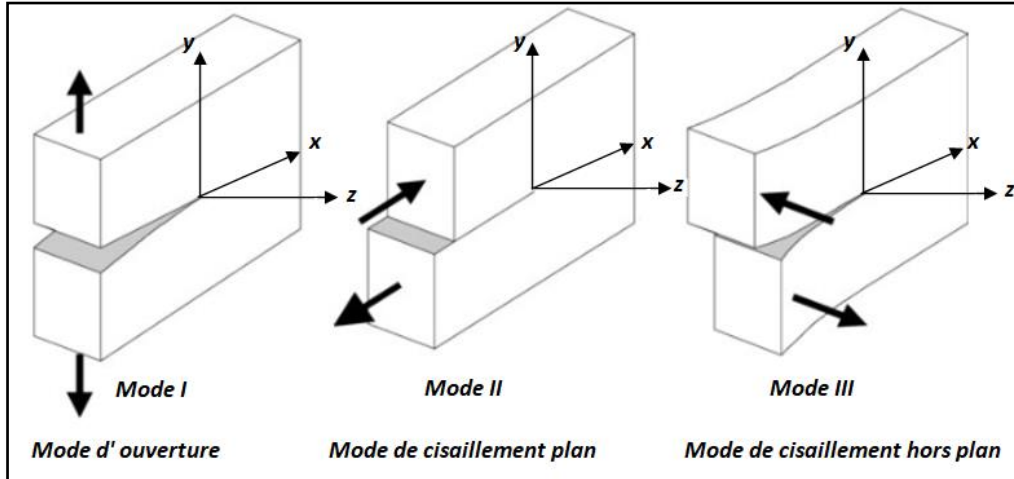


Figure III.3: Les trois modes de rupture

(Aissaoui,2018) et a mentionné les différentes méthodes expérimentales ou numériques pour déterminer le champ de contraintes au voisinage de la pointe de fissure qui augmente proportionnellement au facteur d'intensité de contrainte (SIF) K (exprimé en $MPa\sqrt{m}$) pour chaque mode de rupture ($a = I, II, III$). Ce facteur dépend de la géométrie du corps fissuré, de ses dimensions et du chargement appliqué. Il a la forme suivante :

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} f(a, \Omega)$$

Avec σ est une contrainte qui dépend linéairement du chargement, a est une longueur relative à la géométrie de la fissure et f est une fonction sans dimension de la géométrie de l'éprouvette Ω et de la fissure.

En 1957, (Irwin, 1957) a présenté une solution analytique pour les champs de contrainte (1.2) et de déplacement (1.3) associés à chaque mode à l'intérieur de la zone singulière, en utilisant un développement en série du premier ordre :

$$\sigma_{ij} = \frac{K_\alpha}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^\alpha(\theta)$$

$$u_i = K_\alpha \frac{r}{\sqrt{2\pi}} g_i^\alpha(\mu, k, \theta)$$

Où :

$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}$ Est le module de cisaillement du matériau et k la constante de Kolossov définie par :

$$k = \begin{cases} 3 - 4\nu & \text{en déformation plane} \\ \frac{3 - \nu}{1 + \nu} & \text{en contrainte plane} \end{cases}$$

- **Approche globale : Étude énergétique**

Lorsqu'une structure subit une déformation due à une charge, elle accumule de l'énergie élastique qui peut être libérée sous forme de propagation de fissure. En se basant sur cette observation, (**Griffith, 1921**) a formulé une théorie qui repose sur la compétition entre l'énergie élastique restituée lors de la progression de la fissure et l'énergie dissipée lors de la création de nouvelles surfaces. Il a introduit le concept de taux de restitution d'énergie noté G , qui représente l'énergie nécessaire pour faire avancer la fissure d'une unité de surface.

$$G = - \frac{dW_p}{dA}$$

Où W_p est l'énergie potentielle totale nécessaire pour incrémenter une longueur de fissure a de da provoquant ainsi la création d'une nouvelle surface fissurée dA .

L'énergie potentielle totale stockée dans une structure est la somme de tous les potentiels impliqués dans les différents mécanismes de stockage d'énergie dans le matériau. Cette énergie potentielle peut être attribuée à divers aspects, tels que la déformation élastique, la déformation plastique, la déformation de fissuration et d'autres formes de déformation ou d'interaction dans la structure. Elle est essentielle pour comprendre la réponse globale et la stabilité de la structure, ainsi que pour évaluer son comportement sous différentes charges et conditions environnementales. L'énergie potentielle stockée peut également être utilisée pour évaluer le risque potentiel de rupture ou de défaillance de la structure.

L'énergie potentielle stockée dans la structure résulte d'un bilan énergétique entre l'énergie de déformation élastique W_e et le travail des forces extérieures W_{ext} .

$$W_p = W_e + W_{exp}$$

Il est important de souligner que dans le cadre de cette approche énergétique, il existe un critère de rupture qui stipule que si le taux de restitution d'énergie G dépasse une valeur critique notée G_c , la fissure se propage. Le calcul du taux de restitution d'énergie peut être

réalisé de diverses manières : l'approche locale concerne la relation d'Irwin, la réponse globale implique l'utilisation de la méthode de la complaisance et l'étude numérique, réalisée en utilisant des intégrales de contour.

Lors du développement de la zone de processus de rupture (**FPZ**), il devient impossible d'appliquer la Mécanique Linéaire élastique de la Rupture (**MLER**). Cependant, cette prise en compte de la **FPZ** a conduit à l'émergence d'une approche alternative, connue sous le nom de la Mécanique Linéaire élastique de la Rupture Équivalente (**MLEReq**).

La mécanique linéaire élastique de la rupture équivalente (**MLEReq**) permet de suivre l'évolution du processus de rupture dans les matériaux quasi-fragiles en utilisant la notion de longueur de fissure équivalente qui est introduit par Irwin en 1957, Cette notion est utilisée pour décrire une augmentation fictive de la fissure dans le cas où une nouvelle répartition de contrainte est prise en compte dans la **FPZ**. L'augmentation de la complaisance des échantillons causé par le développement de la **FPZ** est attribuée à la propagation d'une fissure effective ou élastique équivalente. Cette longueur élastique équivalente est définie comme la longueur qui, dans un modèle élastique parfait, donnerait une complaisance similaire à celle observée dans une structure réelle fissurée avec sa zone endommagée (**FPZ**).

III.3.3 La zone de processus de rupture (**FPZ**)

La zone de processus de rupture (**FPZ**) est une zone non-linéaire de microfissure qui se situe autour de la pointe de la fissure. Le comportement de rupture du matériau est influencé par le rapport entre la zone non-linéaire et la taille de la structure qui définit la réponse macroscopique d'une structure.

La ténacité ou la résistance à la rupture devient plus dépendante de la taille de l'éprouvette si la **FPZ** est grande par rapport à la taille de l'éprouvette. En revanche, dans les grands échantillons, la **FPZ** est souvent relativement petite et, par conséquent, la ténacité est indépendante de la taille du spécimen.

La taille importante de la **FPZ** dans les matériaux quasi fragiles, comparée à la taille de la structure, ainsi que son occupation de tout l'espace de la zone non linéaire, rendent les conditions requises pour l'application de la Mécanique Linéaire de la rupture (**MLER**) non satisfaites. En conséquence, la **MLER** ne peut pas fournir des prédictions fiables pour le comportement de rupture de ces matériaux. Il est nécessaire de recourir à la mécanique non linéaire de la rupture dans de tels cas. Ainsi, afin d'appliquer cette approche au béton, une

bonne compréhension et caractérisation de la **FPZ**, notamment de sa taille, sont essentielles pour développer un modèle approprié.

L'existence de la (**FPZ**) devant une fissure ouverte pose un défi analytique dans le cadre de la mécanique continue des solides pour l'étude de la rupture du béton, car d'un point de vue macroscopique, cette zone ne peut être caractérisée ni comme une région continue, ni comme une région discontinue. (Aissaoui, 2018).

La mécanique continue des solides est basée sur des modèles mathématiques qui considèrent les matériaux comme étant continus, homogènes et isotropes. Cependant, lorsqu'une fissure se propage dans un matériau, la **FPZ** autour de la fissure présente des déformations plastiques importantes, ce qui rend difficile de la décrire comme une région complètement continue. D'un autre côté, la fissure elle-même crée une discontinuité dans le matériau, mais la **FPZ** entourant la fissure représente une zone de transition où les déformations sont graduelles entre les régions "fissurées" et "non fissurées".

La caractérisation de la **FPZ** devient donc un problème complexe car elle exige une approche qui tienne compte à la fois des comportements non linéaires de la zone de propagation de la fissure, mais aussi du passage progressif entre les régions intactes et fissurées du matériau.

Pour traiter ce défi analytique, il faut recourir à des techniques de modélisation avancées, telles que la mécanique non linéaire de la rupture, la mécanique de la fracture ou encore la méthode des éléments finis, qui permettent de mieux représenter et comprendre le comportement de la **FPZ**. Ces approches sont essentielles pour étudier la rupture du béton et d'autres matériaux soumis à des charges et des contraintes critiques.

III.3.3.1 La modélisation de la **FPZ**

Il est essentiel de réaliser une modélisation réaliste de la **FPZ** afin de décrire correctement le processus de fissuration dans le béton. De nombreux modèles mathématiques et numériques ont été développés pour simuler cette zone dans différentes conditions de chargement. Ces modèles visent à mieux comprendre et prédire le comportement du matériau lorsqu'il est soumis à des contraintes et à des charges spécifiques. Ces modèles permettent d'étudier les déformations plastiques, les contraintes et les mécanismes de rupture qui se produisent dans la **FPZ**, contribuant ainsi à une meilleure compréhension de la réponse du matériau lorsqu'il est soumis à des contraintes critiques.

- **Le modèle de la fissure cohésive**

Le modèle de la fissure cohésive, également connu sous le nom de modèle de la rupture cohésive, est utilisé pour étudier le comportement de matériaux lorsqu'ils subissent des charges ou des contraintes pouvant entraîner une rupture. Ce modèle est fréquemment employé pour analyser la propagation des fissures dans les matériaux. (Hillerborg et al., 1976) a mentionné deux modèles : le modèle de (Dugdale, 1960) suppose qu'il existe une zone plastique près de la pointe de la fissure. Dans cette zone plastique, une contrainte égale à la limite d'élasticité agit à travers la fissure. Et le modèle de Barenblatt, il est similaire au modèle de Dugdale, mais suppose que la contrainte varie en fonction de la déformation. Ce modèle n'a pas semblé être utilisé dans l'analyse par éléments finis. Sur la base des deux modèles présentés, (Hillerborg et al., 1976) propose un modèle qui est à certains égards similaires au modèle de Barenblatt, comme illustré dans la Figure III.4. Le modèle n'est décrit que pour le mode I (le mode d'ouverture), mais il peut également être appliqué aux modes II et III. Il utilise les contraintes cohésives qui varient selon l'ouverture de la fissure.

On considère la zone de processus de fissuration (FPZ) comme une fissure fictive soumise à des forces externes équivalentes aux forces cohésives transférées par la FPZ au matériau environnant. En réalité, cette fissure cohésive est simplement une représentation imaginaire capable de transférer la contrainte entre les bords de la fissure. La fissure est supposée se propager lorsque la contrainte au fond de la fissure atteint la résistance à la traction (f_t). Lorsque la fissure s'ouvre, la contrainte n'est pas supposée tomber à zéro immédiatement, mais diminuer avec l'augmentation de la largeur de la fissure (w) (Hillerborg et al., 1976).

L'aire sous la courbe Contrainte-Ouverture de fissure représente le taux de libération d'énergie (f_G) Figure III.5. Qui s'écrit par :

$$Gf = \int_0^{w_c} f(w)dw$$

Où :

$f(w)$ est la fonction d'adoucissement (caractéristique intrinsèque) unique du matériau qui doit être déterminée à partir d'essais de laboratoire.

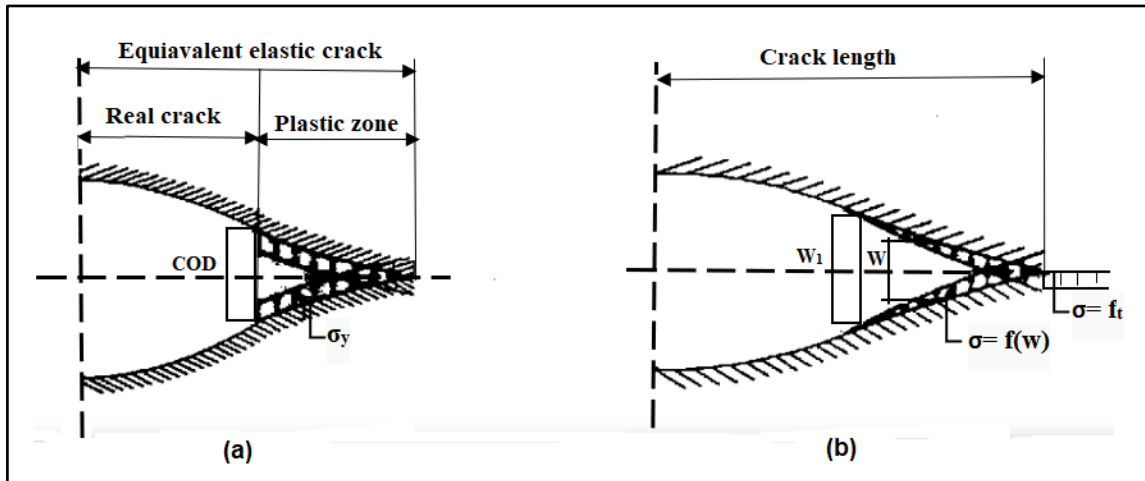


Figure III.4 : Le modèle Dugdale pour la plasticité de la pointe de fissure (a) et le modèle proposé de la fissure cohésive en mode I (b) (Hillerborg et al., 1976)

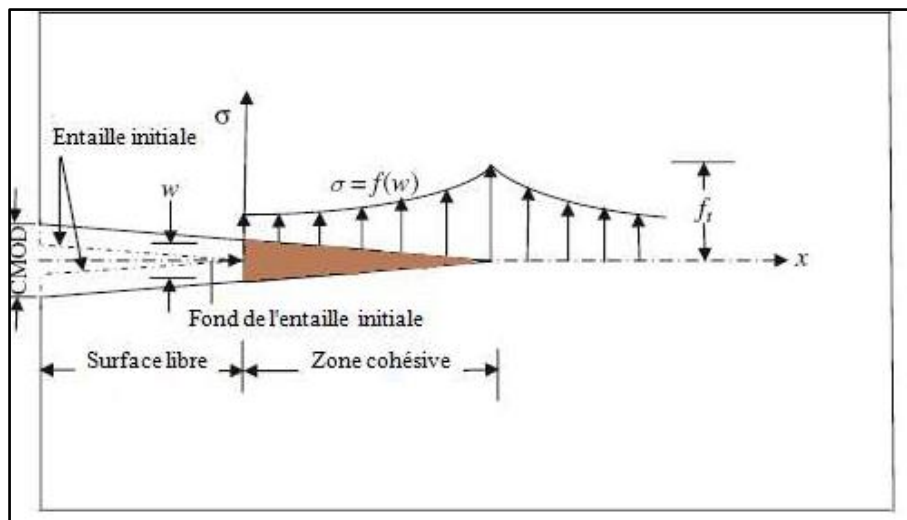


Figure III.5 : Évolution de la fissure cohésive en mode I et répartition des contraintes (Aissaoui, 2018)

- **Le modèle Crack band**

(Bažant & Oh, 1983) ont modélisé la FPZ par un modèle appelé "Crack Band Théory" en considérant une bande finie de microfissures uniformément et continuellement distribuée sur une largeur h . La largeur de la bande est supposée être égale à trois fois la taille du plus grand granulats. Le comportement du matériau est caractérisé par la relation contrainte-déformation.

Dans son implémentation en élément fini, la rigidité et la résistance du matériau d'un élément fissuré sont réduites en fonction de la relation déformation-adoucissement, ceci est équivalent à étaler une fissure discrète sur un maillage en élément fini pour approximer l'endommagement dû à une seule fissure (Aissaoui, 2018).

Selon Bažant, les mesures indiquent que de nombreuses microfissures se concentrent le long d'une ligne sinueuse dans le matériau. Cette ligne suit une trajectoire tortueuse et s'étend de chaque côté de la fissure principale jusqu'à une distance égale à la taille des agrégats présents dans le matériau. Les fissures cherchent à contourner les agrégats plus durs plutôt que de les traverser directement. Cette configuration de microfissures permet au matériau de conserver une certaine ductilité après la fissuration, plutôt que de se rompre brusquement de manière fragile.

- **Le modèle non local**

Les modèles non locaux incluent la notion de "longueur interne caractéristique" du matériau, qui résulte de la nature hétérogène de la structure à l'échelle mésoscopique, comme c'est le cas dans le béton. Cette longueur interne permet de définir les interactions à l'échelle locale et évite ainsi le phénomène de localisation, où les contraintes seraient concentrées en un seul point. Avec l'ajout de cette longueur interne, les modèles non locaux peuvent reproduire une répartition des contraintes dans la zone de fissuration (FPZ - Fracture Process Zone) qui est continue et lisse, plutôt que concentrée en un seul point. Cela permet d'obtenir une meilleure représentation du comportement réel du matériau fissuré.

Il existe deux principaux types de modèles non locaux : les modèles de type intégral et les modèles de type gradient des déformations ou des variables internes.

Le modèle de (**Bažant & Jirásek, 2002**) est un exemple bien connu de modèle non local de type intégral. Ces modèles utilisent des équations intégrales pour décrire les interactions non locales entre les différentes parties du matériau. Ils intègrent les effets à grande distance sur le comportement du matériau en tenant compte des contributions de tous les points environnants.

Modèles de type gradient des déformations ou des variables internes : Ces modèles introduisent des termes de gradient dans les équations de comportement du matériau, ce qui leur permet de prendre en compte les effets non locaux. Ces termes de gradient décrivent la variation des déformations ou des variables internes du matériau sur de petites échelles. Les modèles de type gradient sont souvent plus complexes mathématiquement, mais ils permettent de capturer les effets non locaux de manière plus précise.

En effet, les modèles non locaux sont utilisés pour améliorer la description du comportement des matériaux hétérogènes comme le béton fissuré, en prenant en compte les interactions à grande distance et en évitant la concentration des contraintes en un seul point. La contrainte en un point est obtenue en faisant une moyenne pondérée des variables d'état à

proximité de ce point. La taille de cette zone de voisinage, où la moyenne est effectuée, est définie par le rayon d'interaction non local.

III.3.3.2 Évaluation expérimentale de la FPZ

La dimension de la FPZ est importante pour les matériaux quasi fragiles. C'est une problématique de nature spatiale qui requiert une identification expérimentale essentielle, incluant la mesure de sa longueur et de sa largeur, le volume, etc. La taille de la FPZ est fortement influencée par plusieurs facteurs tels que la dimension de la structure, la longueur de la fissure initiale, le chargement appliqué et les propriétés matérielles du béton. La longueur de la FPZ est tout aussi significative que sa largeur. Les tests de rupture sont le moyen le plus pratique pour obtenir des informations sur l'évolution spatiale de cette zone.

(Aissaoui, 2018) a mentionné plusieurs techniques directes ou indirectes pour caractériser de la FPZ dans les matériaux quasi-fragiles :

La technique de corrélation d'images (Digital Image Correlation - DIC) est une méthode robuste avec une grande précision de mesure, permettant d'obtenir le champ de déplacement de surface comme sortie principale. Ce champ de déplacement peut être utilisé pour calculer les déformations en dehors de la zone de fissures en utilisant la mécanique continue standard (Ferreira et al., 2011 ; Alam, 2011).

En plus de la corrélation d'images, les techniques de mesure par émissions acoustiques, les méthodes d'interférométrie, la microscopie à balayage électronique et la technique de pénétration de colorant sont également utilisées pour visualiser et caractériser la FPZ dans les structures en béton. Des approches telles que l'émission acoustique, l'imagerie par rayons X, et le couplage de différentes techniques peuvent être préférables pour obtenir une caractérisation plus complète de la FPZ.

Les effets de la taille des granulats sur la Fracture Process Zone (FPZ) ont fait l'objet d'une recherche approfondie à la fois par des approches expérimentales et numériques. Les travaux d'Otsuka et Date (Otsuka & Date, 2000) ont démontré, grâce à une série d'expériences sur des échantillons de béton et en combinant les techniques d'émission acoustique et de radiographie (x-ray), que la largeur de la FPZ augmente en proportion de la taille maximale des granulats. Ce résultat a été confirmé numériquement par (Benkemoun et al. 2016) à l'aide d'une approche mésoscopique, qui a mis en évidence une corrélation entre la largeur et le volume de la FPZ et la taille des granulats. L'effet de bord sur la taille de la FPZ a fait

également l'objet d'études de la part de plusieurs auteurs (Saliba et al., 2016 ; Wu & al., 2011).

III.4 Modèles d'endommagement des bétons

Les modèles d'endommagement du béton sont utilisés pour prédire et étudier la façon dont les structures en béton réagissent mécaniquement aux charges et aux contraintes. Le but de ces modèles est de décrire comment le béton subit des changements et des déformations sous diverses conditions de chargement telles que la traction, la compression, la flexion et d'autres types de chargement.

L'endommagement en mécanique des matériaux fait référence au processus graduel d'endommagement interne des matériaux sous l'action d'une contrainte mécanique. Ces dommages peuvent inclure des microfissures, des microdéformations, une séparation de phase, des vides, des fissures, ... etc. Les endommagements peuvent affecter les propriétés mécaniques et la durabilité du matériau, provoquant éventuellement une fracture ou une rupture du matériau. La mesure des dommages est une tâche complexe car elle implique de quantifier les changements internes des matériaux qui ne sont pas toujours directement observables. Selon les propriétés spécifiques du matériau et la portée de l'observation, plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour évaluer les dommages au matériau. La variable d'endommagement peut prendre différentes formes et peut rendre compte des mécanismes d'endommagement collectivement ou individuellement en fonction des propriétés des matériaux et des contraintes. Les dommages peuvent être évalués indirectement en évaluant certaines propriétés physiques parce qu'il :

- Diminue le module d'élasticité original.
- Diminue la densité du matériau.

Les modèles d'endommagement tels que proposés par Mazars, ainsi que les modèles anisotropes et unilatéraux, représentent des approches spécifiques pour expliquer le comportement des matériaux soumis à des contraintes mécaniques.

III.4.1 Modèles d'endommagement isotrope de Mazars

Ces modèles se concentrent sur une détérioration uniforme dans toutes les directions à l'intérieur du matériau. Ils exploitent l'approche de Mazars pour expliquer comment les microfissures se propagent et se développent sous l'influence des charges appliquées. Ces

modèles prennent en compte les effets de la contrainte hydrostatique ainsi que les écarts par rapport à la sphéricité dans le comportement d'endommagement.

III.4.2 Modèles d'endommagement anisotrope

À l'opposé de l'endommagement isotrope, les modèles anisotropes tiennent compte des variations de propriétés mécaniques et de mécanismes d'endommagement en fonction des directions. Ces modèles sont pertinents pour les matériaux anisotropes, où les propriétés varient en fonction de l'orientation des fibres ou des cristaux. L'objectif est de capturer ces variations directionnelles pour offrir une description plus précise du comportement d'endommagement.

III.4.3 Modèles d'endommagement unilatéraux

Les modèles d'endommagement unilatéraux se penchent sur les différences de comportements entre les phases de chargement et de déchargement. Ils admettent que les endommagements subis lors de la phase de chargement peuvent affecter la réponse du matériau lors de la phase de déchargement. Cette propriété est commune aux matériaux composites et à d'autres matériaux non linéaires.

Ces types de modèles d'endommagement sont choisis en fonction des propriétés et du comportement des matériaux étudiés. Chaque modèle a ses avantages et ses limites, et le choix dépendra des caractéristiques du matériau et de la situation de sollicitation.

III.4.4 Problème de localisation : Techniques de régularisation

L'utilisation de modèles basés sur des lois de comportement peut engendrer des problèmes numériques et influencer sur le choix de la stratégie de modélisation. Le principal défi rencontré réside dans la localisation des déformations, particulièrement en raison de l'adoucissement des matériaux étudiés. Cette localisation découle de facteurs physiques et mathématiques et entraîne des conséquences numériques, telles que la perte de précision dans les résultats de simulation.

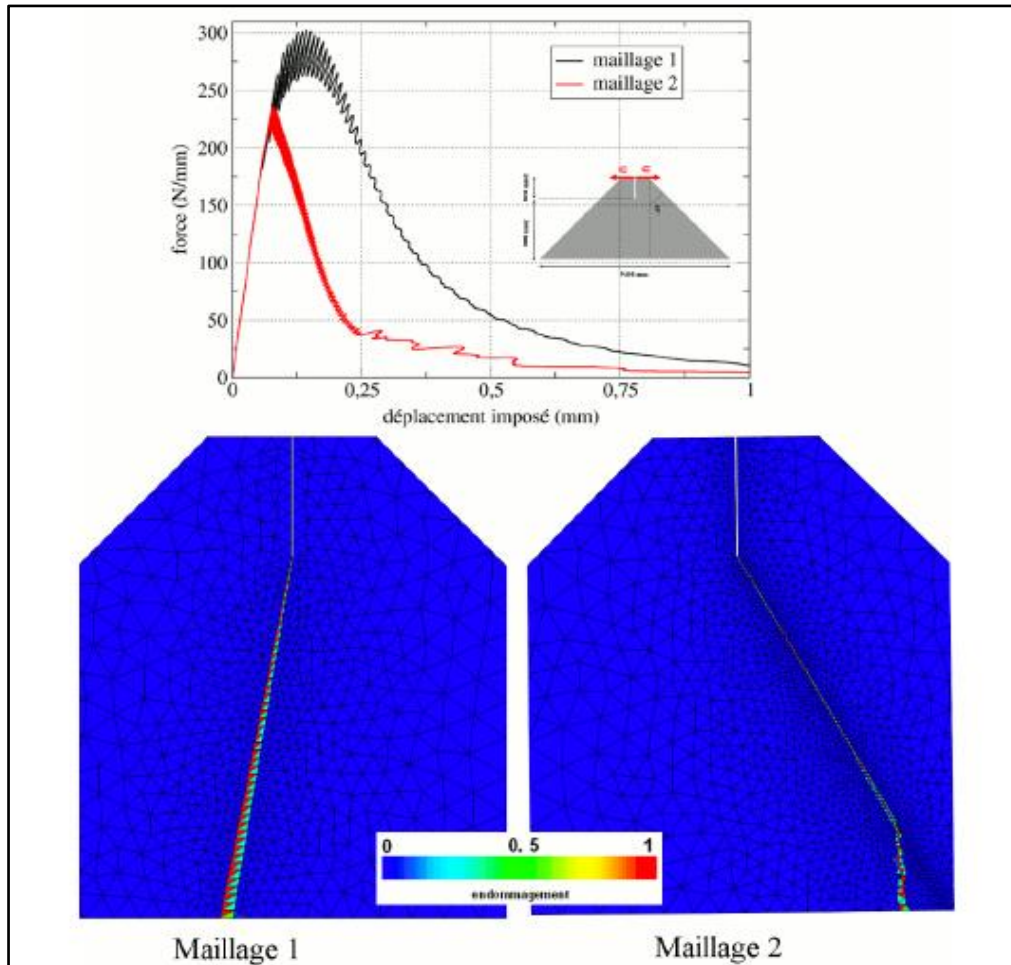


Figure III.6 : Problème de localisation lors d'une utilisation d'un modèle local d'endommagement fragile : champ d'endommagement et réponse macroscopique (Cuvillier, 2012)

En outre, la localisation des déformations se manifeste sous forme de bandes, dont l'épaisseur dépend de la taille des éléments finis utilisés dans la simulation. L'énergie dissipée se trouve alors concentrée dans les éléments où l'adoucissement est en action. En conséquence, deux observations peuvent être formulées : la dimension de la zone de concentration diminue à mesure que le maillage devient plus fin, et cette taille est également influencée par l'orientation des éléments (Figure III.6). Diverses méthodes ont été élaborées pour résoudre ce problème inhérent à la nature fragile du matériau et à la nature de l'approximation aux éléments finis.

- **Régularisation non locale**

L'idée fondamentale de la régularisation non locale repose sur la substitution de la notion de quantité locale par une quantité qui intègre l'influence du voisinage à chaque point considéré. Deux principaux types de modèles non-locaux sont couramment utilisés : le

modèle non-local de type intégral et le modèle non-local de type gradient. Dans le modèle non-local de type intégral, la relation décrivant le comportement en un point est déterminée en prenant en compte une moyenne pondérée d'une variable d'état prise dans le voisinage de ce point. Le modèle non-local de type gradient, la relation constitutive, à la fois au niveau local et dans le voisinage du point, est enrichi par l'ajout du gradient de certaines variables d'état.

- **Régularisation énergétique**

Les travaux de (**Barenblatt, 1962 ; Hillerborg et al., 1976**) ont mis en évidence l'importance de l'énergie de fissuration **Gf** en tant qu'outil de régularisation pour améliorer la précision des calculs de structures et de modèles de matériaux fragiles. Cette approche de régularisation énergétique repose sur des modèles globaux de rupture, tels que les modèles de bande de fissuration et de fissures fictives. L'énergie de fissuration **Gf** est utilisée pour ajuster les paramètres du matériau en fonction de la taille des éléments finis, afin de préserver la dissipation d'énergie indépendamment de cette taille. Cependant, cette régularisation énergétique n'est réalisable que si une relation directe entre l'énergie de fissuration et la loi d'adoucissement est établie, généralement pour des situations unidimensionnelles. La régularisation énergétique contribue ainsi à éviter la surestimation ou la sous-estimation de la dissipation dans les éléments subissant des contraintes non uniaxiales. En effet, l'énergie de fissuration **Gf** est utilisée comme un paramètre de régularisation essentiel pour améliorer la robustesse des calculs de structures et de modèles d'endommagement, en assurant une dissipation d'énergie cohérente et indépendante de la taille des éléments.

III.5 Approches numériques adoptées

III.5.1 Modélisation macroscopique avec Cast3M

CAST3M est un outil de calcul par éléments finis développé par le commissariat de l'énergie atomique et aux énergies alternatives (**CEA**). Ce code intègre le couplage thermique, les matériaux composites et des fonctions multiphysiques grâce à un langage de commande dédié : **GIBIANE**.

Le langage de script distinctif de **CAST3M** facilite la description de la géométrie, la définition des maillages, l'imposition des conditions aux limites et l'automatisation des calculs. Il offre une grande flexibilité pour personnaliser les analyses et créer des procédures réutilisables.

CAST3M possède une vaste bibliothèque d'éléments (**1D, 2D, 3D**, coques, poutres, solides,

éléments thermiques), d'une gestion précise des conditions aux limites et des charges complexes, et d'outils de post-traitement intégrés.

L'analyse numérique macroscopique a été réalisée par la méthode des éléments finis (**MEF**) avec le code Cast3M, en 2D, en supposant des contraintes planes. La modélisation est caractérisée par l'utilisation d'un modèle d'endommagement isotrope, où l'endommagement est uniformément réparti dans le matériau. Des conditions aux limites appropriées ont été sélectionnées pour garantir la précision.

Un ensemble complet de paramètres du béton a été utilisé pour les simulations numériques ; ces paramètres comprenaient le coefficient de Poisson, la masse volumique du béton, le module d'élasticité, l'énergie de rupture, la résistance à la compression et la résistance à la traction. L'objectif principal de cette procédure numérique est de déterminer les propriétés statistiques de la poutre et de générer des courbes, charge-déformation et charge-CMOD. Le critère utilisé dans cette simulation numérique est la technique de régularisation énergétique, basée sur le modèle de zone de fissure proposé par (**Bažant & Oh, 1983**). Le principe sous-jacent est de maintenir constante l'énergie dissipée lors de la fissuration du matériau, quel que soit le raffinement du maillage **MEF**. Cette technique repose sur l'utilisation de l'énergie de rupture comme paramètre de régularisation, ce qui permet de résoudre efficacement le problème de localisation lors des calculs. Sans régularisation, les calculs deviennent excessivement dépendants du maillage. Pour calculer les ouvertures de fissures dans les échantillons de béton, une méthode de post-traitement a été mise en œuvre, proposée par (**Matallah et al., 2010**). Cette méthode s'aligne sur la théorie des bandes de fissures, où les déformations inélastiques au sein de la zone de processus de rupture (**FPZ**) sont réparties sur une bande finie de largeur « h ».

III.5.2 Modélisation macro et méso-échelle avec ABAQUS

ABAQUS est un logiciel de simulation par éléments finis. Il est utilisé pour résoudre des problèmes complexes dans plusieurs domaines :

Le domaine de la mécanique des structures tels que les analyses statiques, dynamiques, linéaires et non linéaires, l'étude du comportement de matériaux hétérogènes, composites, ou présentant fissuration et endommagement.

Le domaine thermique et multiphysique, comme les rayonnements thermiques.

Le domaine de modélisation multi-échelles, l'analyse globale des structures par la modélisation macroscopique et la représentation précise des hétérogénéités comme les granulats, les fibres et les interfaces grâce au langage de modélisation de ce code.

La simulation dans ce code s'effectue en deux étapes, la première sur l'interface graphique CAE conçue à la modélisation, le maillage et le post-traitement. La deuxième, est sur un fichier input (.inp) pour le contrôle avancé des paramètres et la personnalisation des calculs.

La bibliothèque d'ABAQUS facilite les diverses analyses, ce logiciel étant conçu pour le calcul de différents éléments, tels que les poutres, les coques, les solides 3D, les éléments thermiques et les éléments cohésifs pour la fissuration. Il offre aussi une diversité en termes de lois de comportement. Le choix de ce logiciel dans cette étude repose sur sa capacité à simuler la fissuration et l'endommagement, sa flexibilité de modélisation, sa fiabilité et sa validation scientifique et sa polyvalence multi-échelle. Ce dernier a été déterminant pour la conduite des analyses mésoscopiques des bétons composites.

III.5.2.1 Modèle CDP (Concrete Damaged Plasticity) pour le béton

Pour simuler le comportement non linéaire du béton et des granulats recyclés (**RA**), le modèle de plasticité du béton endommagé (**CDP**) disponible dans Abaqus a été utilisé. Ce modèle traite le béton et le **RA** comme deux matériaux distincts, présentant des paramètres mécaniques et d'endommagement différents.

La dégradation progressive de la rigidité causée par la fissuration en traction et l'écrasement en compression ; la déformation plastique provoquée sous les deux états (traction et compression).

Le comportement contrainte-déformation est défini par la relation suivante :

$$\sigma = (1 - d) \cdot D^e : (\varepsilon - \varepsilon^p)$$

Où :

σ est le tenseur des contraintes,

d est variable scalaire d'endommagement ,

D^e est le tenseur de rigidité initial,

ε est la déformation totale,

ε^p est la déformation plastique.

Les paramètres de plasticité ont été inclus dans le modèle, tels que l'angle de dilatation, l'excentricité, le rapport de résistance à la compression biaxiale à uniaxiale, le facteur de forme et le paramètre de viscosité. Les éléments finis solides, également appelés éléments finis continus, sont utilisés pour modéliser la géométrie de l'échantillon de béton dans ces études.

III.5.2.2 Modélisation de la plasticité des aciers

Un modèle élastoplastique à durcissement isotrope a été utilisé pour l'armature en acier. La déformation plastique, caractérisée par un module de durcissement constant et une loi contrainte-déformation bilinéaire, incluant une phase élastique linéaire initiale, a été utilisée pour déterminer le comportement.

L'expression du critère de plasticité est :

$$f(\sigma) = \sqrt{\frac{3}{2} s : s} - \sigma_y \leq 0$$

Où :

s est le tenseur des contraintes déviatoriques,
 σ_y la limite d'élasticité de l'acier.

Le matériau est élastique tant que $f(\sigma) \leq 0$; le comportement plastique débute lorsque la contrainte équivalente atteint σ_y .

III.5.2.3 Méthode PI (π) pour la distribution des granulats

Comme de nombreuses autres constantes scientifiques et mathématiques, la valeur de π (Pi) a retenu l'attention des chercheurs depuis la nuit des temps. En effet, elle décrit le rapport entre la circonférence d'un cercle et son diamètre. Sa première mention remonterait aux Babyloniens, qui l'ont fixée à 3,125 (**Badger, 1994**), puis aux Égyptiens, qui l'ont estimée à 3,1605. L'une des premières et des plus précises estimations de la valeur de π provient d'Archimède, qui l'a estimée entre 3,1408 et 3,14285. Cette estimation a été réalisée en utilisant la méthode des polygones, une méthode bien plus rigoureuse et efficace que toutes celles utilisées auparavant (**Badger, 1994**). Au 18^e siècle, le problème de l'aiguille de Buffon était une heuristique célèbre basée sur l'aiguille, qui est devenue la pierre angulaire de nombreuses approches stochastiques de π (**Solomon, 1978, Diaconis, 1976, Dörrie, 1965**).

Dans leurs travaux ultérieurs, **Schuster (1974)** et **Mantel (1953)** se sont également intéressés aux probabilités géométriques et à leur relation avec la valeur de π .

Jusqu'à présent, ces approches probabilistes de la valeur de Pi étaient presque toujours utilisées à des fins mathématiques et théoriques. Cependant, ces mêmes principes ont été mis à profit en dehors du domaine des mathématiques, en génie civil. Dans ses travaux, (**Dilbas, 2021**) a utilisé la méthode de **Monte-Carlo** pour simuler la distribution des granulats dans le béton, considérant leur placement comme aléatoire, à l'instar de l'aiguille de Buffon. Cela a permis une représentation plus précise de la distribution interne de la structure du béton.

III.5.2.3.1 Principales méthodes de détermination de π

- **Méthodes de Buffon ("falling needle")**

Georges-Louis Leclerc, comte de Buffon, a proposé au 18^e siècle de réaliser une expérience qui consiste à laisser tomber une aiguille de longueur L variable sur un plan comportant des lignes parallèles à une distance d (**Buffon, 1777 ; Solomon 1978 ; Diaconis 1976**). On peut montrer que l'une des probabilités que l'aiguille croise une ligne est en fonction de π . Elle a servi pour illustrer en premier des modèles de **Monte Carlo**.

- **Méthodes géométriques (circonférence/ diamètre)**

Pour la première fois dans l'histoire de l'humanité, Archimède (287– 212 av. J.-C) a donné une raison géométrique sur π pour un problème qui remonte à l'époque de la grande civilisation de l'Égypte. Cette méthode qui est de type déterministe, consiste encore une fois dans le calcul du rapport de la partie supérieure de l'un des arcs à la partie supérieure de l'un de ses côtés. Cette méthode a nécessité à Archimède $3,14108 < \pi < 3,141285$.

- **Méthode de distribution des granulats ("falling aggregate")**

(**Dilbas, 2021**) a développé une nouvelle méthode pour simuler la distribution des granulats dans le béton en utilisant des méthodes probabilistes classiques telles que l'aiguille de Buffon. Il a simulé les granulats par des particules rigides disposées aléatoirement dans un volume donné, comme le béton fait sa prise. Cette méthode repose sur le principe de simulation de Monte Carlo, où les positions et orientations des particules sont générées aléatoirement, vérifiées et acceptées ou rejetées selon des critères géométriques d'intersection et de chevauchement.

L'objectif principal était de combler une lacune dans la littérature en se concentrant sur la localisation et le comportement des granulats lors de leur chute dans le béton, en tenant compte de leur taille, forme et volume de remplacement, afin d'étudier l'influence sur la

microstructure du matériau et ses propriétés mécaniques. A cette fin, des granulats de marbre colorés de taille maximale sont utilisés pour mieux visualiser leur répartition. Contrairement aux conceptions traditionnelles en béton, aucune vibration, compactage manuel ou secousse n'est appliqué pendant le processus de coulée afin d'observer le comportement naturel des granulats en chute. D'après les résultats obtenus, il a été confirmé par Dilbas que la distribution des granulats pouvait être estimée et que l'influence de certains paramètres de formulation sur les performances du béton pouvait également être évaluée, ce qui souligne l'importance de l'approche adoptée. Il a ainsi réussi à prouver que sa méthode fait le lien entre les concepts abstraits de la probabilité géométrique et les défis concrets en ingénierie civile.

III.5.2.3.2 Application de la méthode PI dans la modélisation numérique

Dans cette partie, la rupture et les réponses mécaniques de l'éprouvette en béton armé basée sur la méthode RA sont étudiées à l'échelle mésoscopique à l'aide d'un logiciel commercial d'éléments finis (EF) (ABAQUS). La distribution des granulats est réalisée selon la méthode de distribution pi afin de construire le modèle structural des échantillons en béton armé à l'échelle mésoscopique. Cette méthode est unique car elle prend en compte la distribution non aléatoire des granulats basée sur l'expérience de chute des granulats, qui simule le processus naturel de mise en place des granulats lors du coulage du béton. Contrairement à d'autres méthodes, elle prend en compte la variation spatiale et la distribution réaliste des granulats, offrant une représentation plus précise de la structure interne et de la texture du béton. Cette méthode a été sélectionnée pour l'étude car son accent sur la modélisation à l'échelle mésoscopique s'inscrit dans la perspective de l'étude visant à comprendre le comportement mécanique du béton armé. En prenant en compte l'hétérogénéité inhérente au béton, la méthode de distribution Pi permet une évaluation plus précise des effets de la méthode RA et des armatures en acier sur des propriétés telles que la ductilité, la redistribution des contraintes et la performance globale.

III.6 Conclusion

La modélisation de l'endommagement du béton constitue un enjeu difficile et majeur dans le monde de l'ingénierie civile, sachant que le béton est un matériau hétérogène et quasi-fragile qui peut être soumis à différents modes d'endommagement en fonction des charges et sollicitations qu'il subit. Il s'avère être essentiel de comprendre et de prévoir le comportement de tels matériaux afin de garantir la sécurité et la durabilité des structures.

L'utilisation d'un modèle local tel que celui proposé par Mazars se heurte à la problématique de la localisation étant dépendante du maillage. Il est donc nécessaire d'apporter une régularisation permettant ainsi d'éviter cette localisation de l'endommagement. Cela peut passer par une approche non locale par l'utilisation d'une fonction de pondération ou par la prise en compte d'un terme de gradient, ce qui impose la définition d'une longueur caractéristique.

Une autre approche de régularisation est possible et peut aussi être adoptée à l'utilisation de l'énergie de rupture. Ce procédé qui repose sur le principe du « Crack band » est également choisi dans cette étude pour compléter un modèle d'endommagement isotrope. Les simulations numériques des modèles d'endommagement seront mises en œuvre dans le chapitre suivant, à l'aide des logiciels Cast3M et ABAQUS. Ces outils permettront d'étudier le comportement des bétons fissurés et d'endommagement sous différents chargements, en mettant en exergue l'influence des matériaux et des conditions. Une étude paramétrique sera élaborée afin d'évaluer la fiabilité des approches proposées dans ce travail.

Chapitre IV

Modélisation Numérique et Validations

« L'expérience est la seule source de vérité. Elle seule peut nous apprendre quelque chose de nouveau, nous mettre en présence d'un fait que la raison n'aurait jamais soupçonné. »

Claude Bernard

IV. 1 Introduction

L'analyse numérique du comportement des structures fissurées et des poutres nécessite l'utilisation de logiciels de simulation spécialisés par éléments finis tels que Cast3m et Abaqus, permettant d'étudier la propagation des fissures et des entailles sur la résistance et la déformation de ces poutres.

En analysant les données obtenues, on peut optimiser la conception pour améliorer la résistance tout en minimisant les risques de rupture. L'intégration des résultats expérimentaux dans l'analyse numérique joue un rôle majeur dans la validation et l'amélioration de la précision des simulations. Cela assure que le modèle numérique proposé est relativement précis pour décrire le comportement réel des poutres.

Ce chapitre traite alternativement la modélisation des poutres à l'échelle macroscopique et mésoscopique. La validation avec des résultats expérimentaux a été effectuée pour démontrer la fiabilité des simulations d'analyse du comportement des bétons composites à base de déchets recyclés.

IV. 2 Modélisation macroscopique avec Cast3M

La modélisation numérique par éléments finis avec CAST3M comprend l'introduction de la géométrie, l'attribution des propriétés matérielles, l'application des conditions aux limites, la modélisation des entailles et fissures, le maillage, la simulation, l'analyse des résultats et la validation. Cette procédure est essentielle pour une application pratique optimale et une solide compréhension de la matière. En cas de divergence entre les résultats expérimentaux et numériques, des ajustements sur les propriétés matérielles ou d'autres paramètres du modèle

numérique peuvent être effectués pour les calibrer en fonction des données observées. Cela peut aider à améliorer la précision des simulations.

IV.2.1 Méthodes expérimentales

Une recherche bibliographique approfondie a été menée dans le but de rassembler les données nécessaires pour effectuer une analyse comparative entre les résultats des essais expérimentaux et les résultats issus des simulations numériques. Dans l'analyse de poutres entaillées, il est essentiel d'incorporer un ensemble complet de paramètres afin d'assurer des conclusions fiables. Parmi ces variables, les caractéristiques du béton, y compris son intégration avec des matériaux recyclés, jouent un rôle primordial. Des éléments tels que le module d'élasticité, l'énergie de rupture, la résistance à la compression, la résistance à la traction et le coefficient de Poisson révèlent une importance cruciale dans cette démarche.

Une maîtrise approfondie et une utilisation rationnelle de ces facteurs sont indispensables pour obtenir une modélisation précise du comportement mécanique des poutres entaillées, notamment lorsque le béton intègre des matériaux recyclés.

Les essais expérimentaux requis pour cette étude sur le béton composite élaboré à partir de matériaux recyclés se focalisent principalement sur l'analyse de ses caractéristiques mécaniques. Dans le contexte de ce travail, les matériaux principalement incorporés dans le béton recyclé sont le caoutchouc, le verre et le basalte.

L'étude menée par (Hilal, 2016). vise à approfondir notre compréhension de l'impact des déchets de caoutchouc sur les propriétés des mélanges de béton autoplaçant, tant à l'état frais qu'à l'état durci. En outre, l'objectif est d'évaluer comment le remplacement des granulats fins et grossiers par du caoutchouc influe sur la composition et les caractéristiques du béton. Pour ce faire, divers paramètres expérimentaux ont été considérés. L'utilisation de trois grades de déchets de pneus et de granulats de caoutchouc différents apporte une diversité essentielle aux compositions étudiées. De plus, six niveaux de pourcentages (0 %, 5 %, 10 %, 15 %, 20 % et 25 %) de ces matériaux recyclés ont été soigneusement choisis pour évaluer leur influence graduelle. L'approche adoptée pour cette étude contribue à une meilleure compréhension des possibilités d'utilisation des déchets de caoutchouc dans le béton autoplaçant et à une caractérisation plus précise de leurs effets sur les propriétés mécaniques et structurelles du matériau. L'étude a employé deux types de déchets de pneus en caoutchouc issus de la recherche de (Hilal, 2016), à savoir les miettes de caoutchouc (CR) et copeaux de pneus (TC), récupérés

à partir de pneus de camions usagés. Des dimensions variées de granulats de caoutchouc ont été utilisées. Dans notre étude, nous avons retenu les granulats de 10 à 40 mm (TC) ainsi qu'un mélange de deux tailles de miettes de caoutchouc (MCR), avec l'objectif de parvenir à une granulométrie similaire à celle du sable. Ces mélanges ont été soumis à un essai de flexion en trois points sur des spécimens fissurés de dimensions (500x100x100) mm³. Les résultats intéressants tirés de l'étude sont l'énergie de rupture, le module d'élasticité, la résistance à la compression et la résistance à la traction.

Une autre étude menée par (Arslan, 2016) s'est focalisée sur l'incorporation de déchets de verre (GF) et de basalte (BF) en tant qu'additifs dans la formulation du béton. L'objectif de cette recherche était d'exploiter ces matériaux recyclés afin d'améliorer les propriétés du béton tout en réduisant l'impact environnemental de la construction. Les conclusions de cette étude ouvrent des perspectives prometteuses quant à la viabilité de cette approche innovatrice dans le domaine de la construction durable.

L'analyse approfondie entreprise a porté sur les propriétés de rupture de différentes catégories de béton, incluant les bétons renforcés de fibres de basalte et de fibres de verre. Au moyen d'essais de flexion à trois points réalisés sur des poutres entaillées aux dimensions de (50 x 100 x 480) mm³. Cette étude a procuré des informations cruciales concernant les propriétés de rupture propres à chaque variété de béton.

Comme indiqué précédemment, cette étude s'est focalisée sur des fibres de basalte et de verre d'une longueur de 24 mm, tout en variant les niveaux de teneur en fibres (0,5, 1, 2 et 3 kg/m³). L'objectif était d'examiner leur impact sur les propriétés mécaniques et la résistance à la rupture des bétons renforcés de fibres de basalte et des bétons renforcés de fibres de verre.

IV.2.2 Maillage éléments finis et conditions aux limites

Dans cette recherche, nous étudions le cas d'une éprouvette trapézoïdale entaillée testée par un essai de flexion à trois points, soumise à une charge de déplacement imposée. Le maillage de la poutre est composé d'éléments quadrilatéraux (élément à 4 nœuds avec interpolation linéaire, QUA4). Comme illustré dans la **Figure IV. 1**, nous considérons trois tailles de maillages (zone 1, zone 2 et zone 3) pour lesquelles nous réduisons la taille caractéristique des maillages au niveau de la zone d'intérêt qui constitue le ligament. La première zone (zone 1), est celle qui possède le maillage le plus large, ensuite la deuxième zone (zone 2) qui est plus raffinée où le maillage est 3 fois plus petit par rapport à la première. Dans la partie centrale de

la poutre, zone 3 où les dommages sont susceptibles de se produire à la proximité immédiate des éléments de l'entaille est trois fois plus petite que celle des éléments environnants de la zone 2, sur une épaisseur correspondant à la largeur de la bande illustrée dans la **Figure IV. 1**. Une liaison est établie entre les zones de la poutre avec un maillage progressif permettant une transition en douceur entre les différentes zones de la poutre ; Cette technique a été appliquée pour réduire le temps de calcul. Les dimensions de toutes les éprouvettes sont $(L \times b \times h)$ mm³, la distance entre les appuis est S , avec un rapport hauteur de l'entaille sur hauteur de la poutre (a/h) . Les détails géométriques de la poutre entaillée sont donnés dans la **Figure IV. 2**.

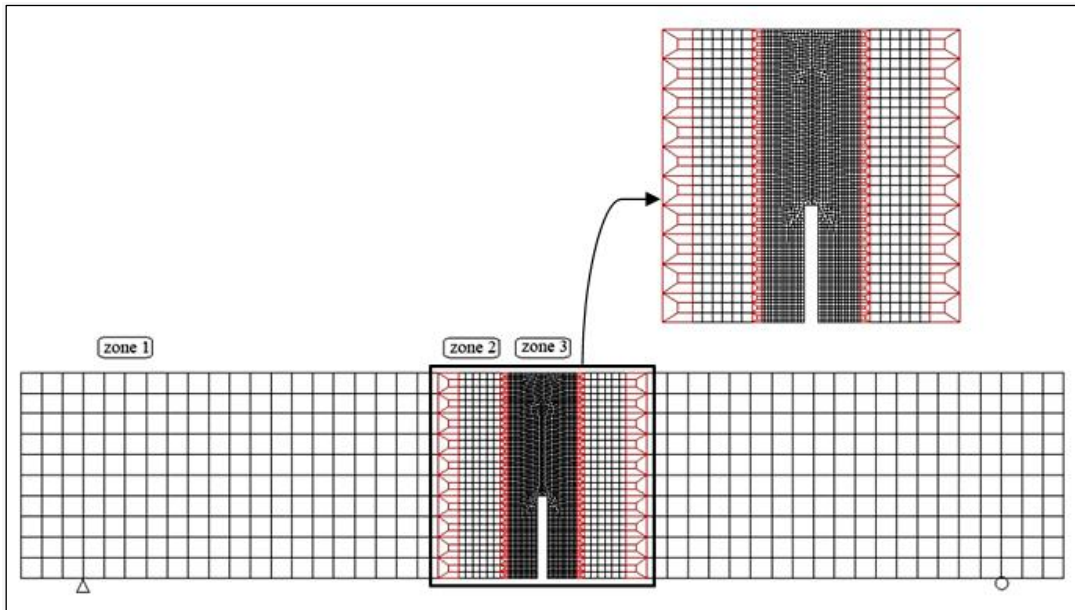


Figure IV. 1 : Maillage élément finis de la poutre entaillée en flexion trois point

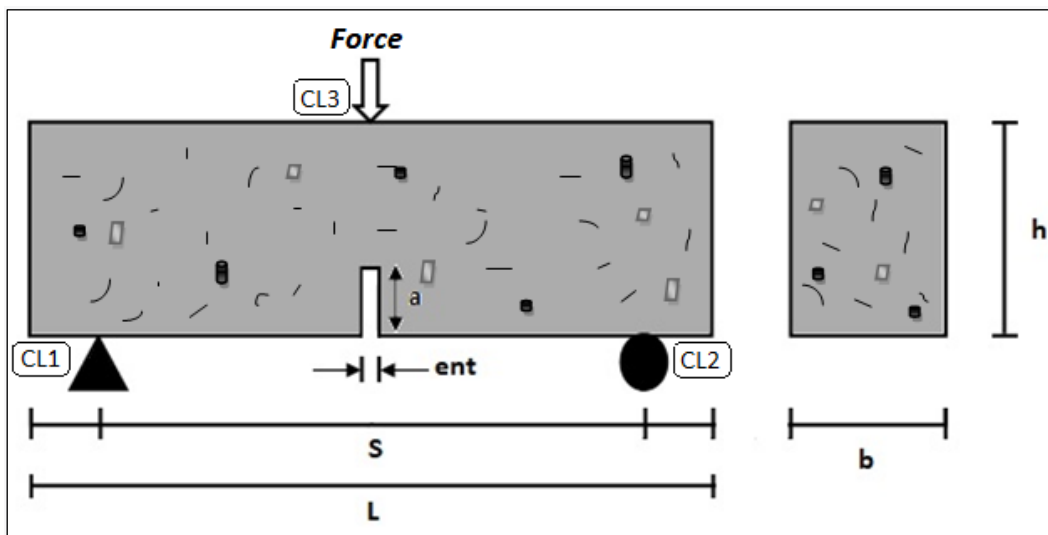


Figure IV. 2 : Géométrie des éprouvettes entaillées

Les conditions aux limites sont appliquées à la poutre qui est simplement supportée à ses appuyées. Les conditions aux limites CL1 et CL2 concernent respectivement les appuis gauche

et droit de la poutre (**Figure IV. 2**). La condition aux limites CL3 est située au niveau du nœud d'application de la charge au milieu de la portée de la poutre, où le déplacement horizontal est bloqué. La forme trapézoïdale choisie pour cette éprouvette permet de se placer dans le cas d'une propagation stable de la fissure et d'éviter d'éventuelles bifurcations de la fissure par rapport au parcours initial rectiligne (**Cuvillier, 2012**).

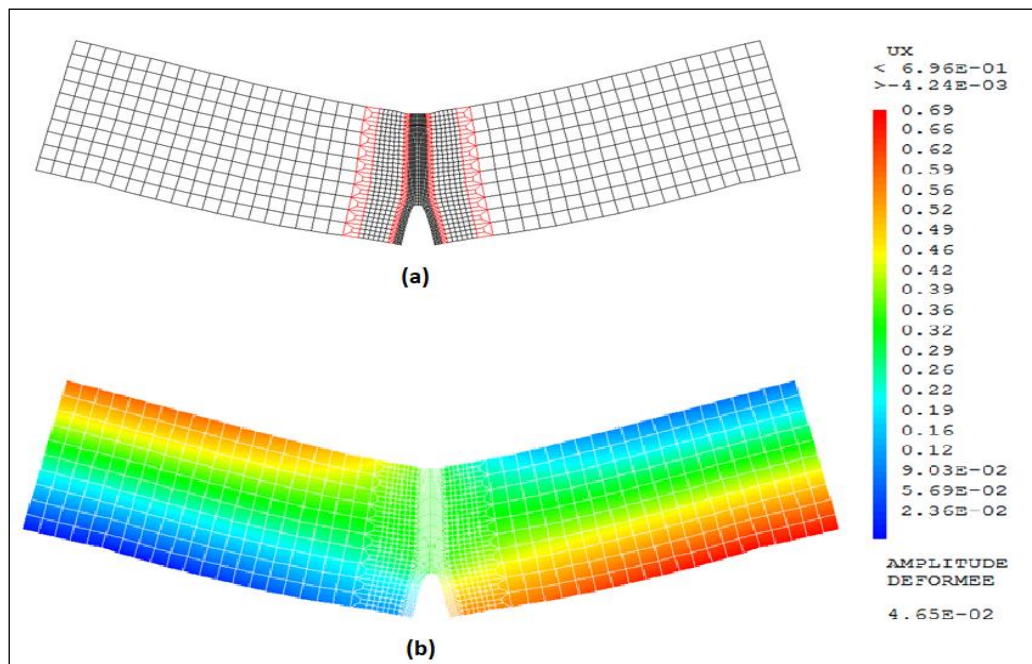


Figure IV. 3 : Champ de déformation de l'essai de flexion à trois points sur une éprouvette soumise à une charge concentrée au milieu de la portée (a), l'amplitude de déformation (b)

Les **Figures IV.3 et IV.4** montrent la déformation et les contraintes pendant le chargement dans un essai de flexion à trois points au milieu de la portée de la poutre. La propagation des endommagements dans le béton a été localisée au niveau des points médians.

Afin d'améliorer le taux de convergence entre les résultats numériques obtenus par la méthode des éléments finis pour la poutre fissurée et les courbes expérimentales (**Arslan, 2016 ; Hilal, 2016**), nous avons effectué une analyse inverse en agissant sur certains paramètres liés aux propriétés des matériaux. Le programme d'éléments finis Cast3M permet le calcul numérique des courbes charge-déplacement et charge-CMOD pour plusieurs types d'additifs incorporés dans la formulation du béton.

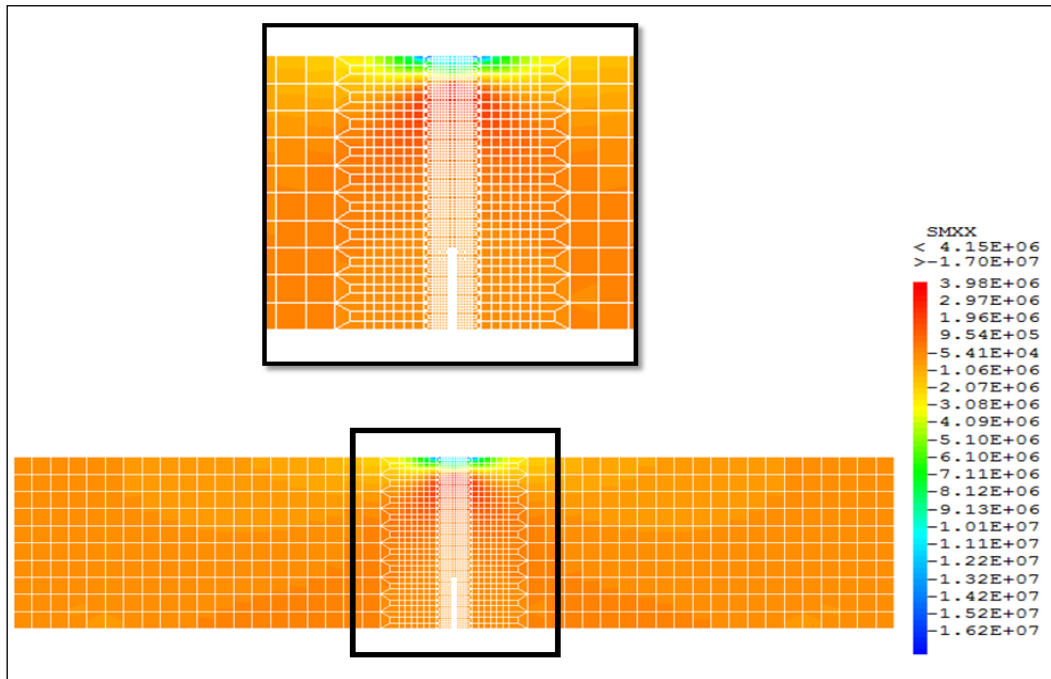


Figure IV. 4 : Champ de contrainte de l'essai de flexion à trois points sur une éprouvette soumise à une charge concentrée au milieu

IV.2.3 Validation et interprétation des résultats

IV.2.3.1 Courbe Charges-Déplacement

La **Figure IV. 5** permet d'observer les courbes charge-déplacement issues du test de flexion en trois points effectué sur des poutres de béton composite. Cette représentation met en évidence la comparaison entre les courbes charge-déplacement obtenues à partir d'études expérimentales et numériques.

Les modèles numériques et les expériences présentent une bonne corrélation en termes de tendance des courbes, de comportement Post-Pic et de convergence au niveau de la charge maximale. L'utilisation de déchets de caoutchouc et de pneus dans les mélanges de béton affecte de manière significative la rigidité avant le pic de la courbe charge-déplacement, tant dans les études expérimentales que numériques. L'ajout progressif de particules de déchets a entraîné une augmentation graduelle de l'espace entre les courbes charge-déplacement numériques et expérimentales, comme illustré dans la **Figure IV. 5**, à l'exception des échantillons MCR20 et TC25.

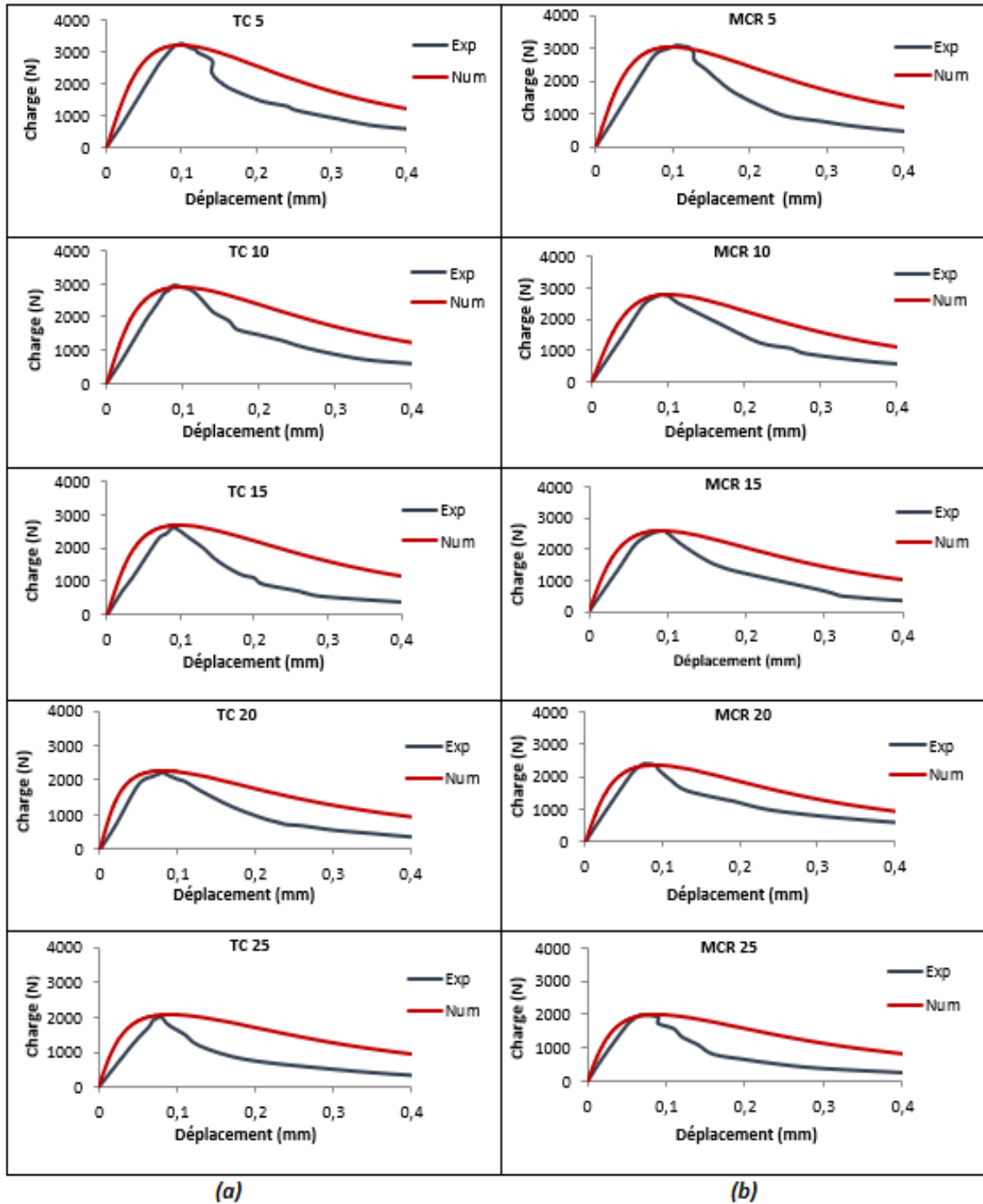


Figure IV. 5 : Résultats des simulations numériques et des courbes expérimentales (Hilal, 2016) : charge-déplacement pour copeaux de pneus (a) et le mélange de miettes de caoutchouc (b)

Dans la **Figure IV.5**, la présentation distincte des courbes charge-déplacement vise à mettre en évidence de manière plus claire l'effet du type et du pourcentage de fibres sur la capacité de charge et le déplacement. Il est possible d'observer à partir de la **figure IV. 5** que TC5 et MCR5 affichent des capacités de charge les plus proches des résultats expérimentaux. Cela signifie

que cette simulation numérique est plus pertinente pour des substitutions de déchets de caoutchouc à faible quantité, que ce soit en remplacement de granulats fins ou grossiers. Pour l'ensemble des contenus de (TC) et (MCR), les charges maximales atteintes par simulation numérique étaient en étroite concordance avec celles obtenues par l'étude expérimentale de léssais sur poutres entaillées. De plus, les charges maximales obtenues en remplaçant les granulats fins par des copeaux de pneus sont supérieures à celles obtenues par remplacement avec des miettes de caoutchouc. La proportion de caoutchouc dans le béton a généralement été remplacée jusqu'à 100% en fonction du volume global, mais entre 20% et 25%, on observe une diminution systématique de la résistance à la compression et de la résistance à la traction axiale du béton. Il est donc nécessaire de limiter le niveau de caoutchouc résiduel dans le béton, comme indiqué dans l'étude de (Bideci et al., 2017).

Les **Figures IV.6** et **IV.7** représentent la relation entre le déplacement maximal et le taux de substitution des composites TC et MCR produits dans cette étude. L'objectif est de comparer les résultats numériques et expérimentaux. Les graphiques en **Figures IV.6** et **IV.7** révèlent que les déplacements maximaux obtenus par simulations numériques sont supérieurs à ceux issus des tests expérimentaux, à l'exception de (TC5, MCR5 et MCR15).

Il est noté que dans la **figure IV. 6**, une augmentation de la corrélation entre les résultats numériques et expérimentaux avec l'augmentation du dosage des fibres TC, à l'exception de TC20 qui a présenté une convergence plus élevée entre les résultats numériques et expérimentaux, avec une valeur maximale de déplacement identique (0,08 mm) pour les études expérimentales et numériques. Pour TC5, TC10, TC15 et TC25, la convergence croissante est de 1 %, 7,78 %, 10 % et 16,25 %, respectivement.

La **Figure IV. 7** indique que MCR5 enregistre la convergence la plus élevée avec un ratio de 7,62 %, ce qui signifie une différence moindre entre les résultats numériques avec $D_{\max} = 0,097$ mm et expérimentaux avec $D_{\max} = 0,105$ mm. Ensuite, MCR15 affiche une différence de 8 %. Pour les mélanges de béton MCR10 et MCR20, les convergences sont respectivement de 11,11 % et 11,3 %. Enfin, le mélange MCR25 présente la plus grande divergence entre les résultats, avec 25,7 %. En augmentant le taux de remplacement par des agrégats de caoutchouc, qu'ils soient sous forme de miettes ou de copeaux, les valeurs maximales de déplacement expérimentales et numériques augmentent, à l'exception de TC20 et MCR15, qui présentent une diminution de la différence par rapport aux autres résultats.

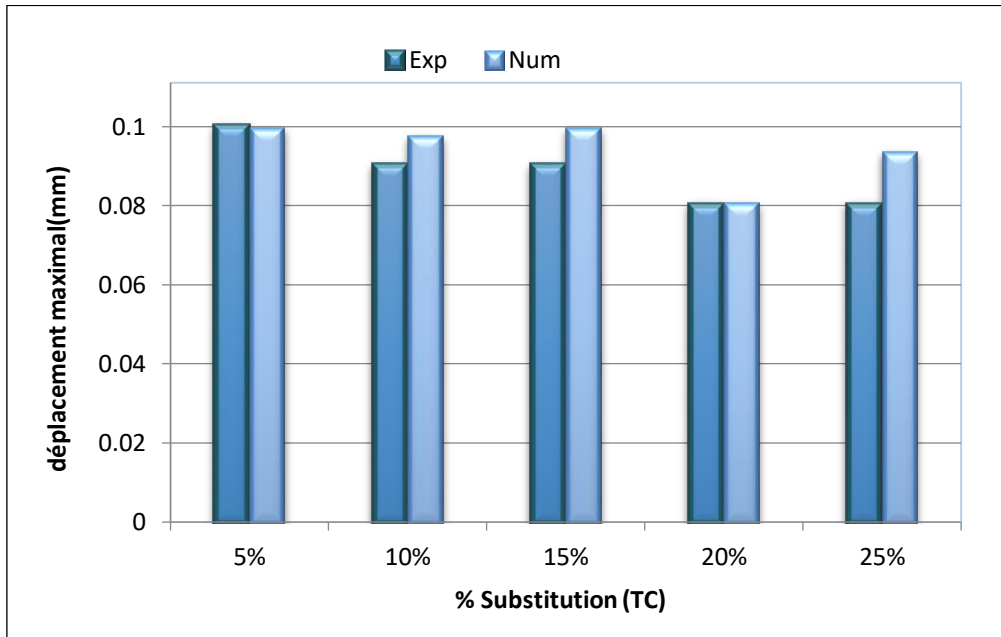


Figure IV. 6 : Déplacement expérimental (Hilal, 2016) et numérique en fonction du rapport de contenu de copeaux de pneus (TC)

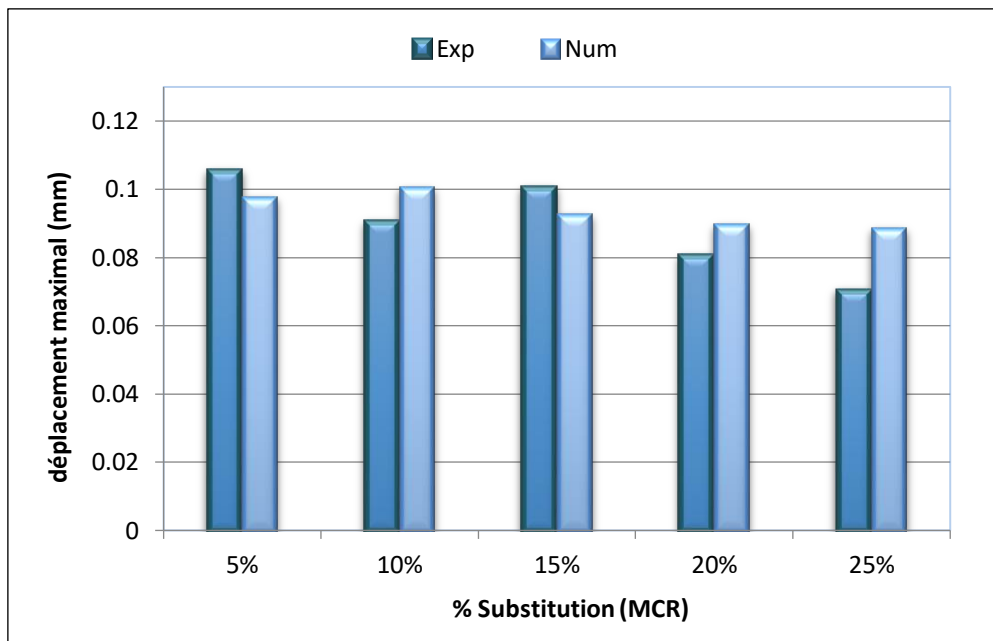


Figure IV. 7 : Déplacement expérimental (Hilal, 2016) et numérique en fonction du rapport de contenu de miettes de caoutchouc (MCR)

IV.2.3.2 Courbe Charges-CMOD

Les résultats présentent les courbes Charge-CMOD obtenues à la fois par simulation numérique et par expérimentation pour des poutres entaillées contenant différentes densités de fibres de verre (GF) et de basalte (BF) (0,5 ; 1 ; 2 et 3 kg/m³), comme illustré dans la Figure IV. 8. Cette représentation visuelle a pour objectif de mettre en relief de manière plus distincte

l'influence du type et de la quantité de fibres sur la capacité de charge et le CMOD, facilitant ainsi la comparaison entre les études expérimentales et numériques.

Il est manifesté qu'à partir de la **Figure IV.8**, quelle que soit la quantité des fibres utilisée, la charge maximale obtenue par simulation numérique coïncide étroitement avec celle obtenue par essais expérimentaux. Les résultats numériques soulignent que les variations dans les types et les quantités de fibres ont un impact limité sur la capacité de charge maximale. Il est pertinent de noter que BF2 et GF1 démontrent la plus grande capacité de charge. En parallèle, BF3 et GF0,5 présentent la corrélation la plus cohérente entre les résultats numériques et expérimentaux. À titre d'exemple, l'écart entre les valeurs de charge maximale obtenues par simulation numérique et par essais expérimentaux est de seulement 0,55 % et 0,04 %, respectivement. Dans le cas des autres mélanges de fibres, les différences entre les charges maximales issues des études expérimentales et celles dérivées des simulations numériques varient de 0,07 % à 1,42 %.

Les courbes des valeurs moyennes de CMOD en fonction des taux de substitution obtenus à partir des résultats numériques et expérimentaux sont illustrées dans les **figures IV.9** et **IV.10**, pour les mélanges de béton intégrant des fibres de verre (**GF**) et de basalte (**BF**). Dans l'ensemble des mélanges, les résultats numériques sont plus importants par rapport aux résultats des essais expérimentaux. L'analyse de la **figure IV. 9** révèle que tous les échantillons présentent quasiment le même niveau de convergence entre les résultats numériques et expérimentaux. La convergence la plus marquée est observée pour BF2, avec un écart de seulement 17,5 % entre les résultats de simulation et les essais réels. Quant aux autres mélanges, à savoir BF0,5; BF1 et BF3, leurs écarts respectifs sont de 32,5 %, 25% et 33%.

Ces conclusions suggèrent qu'il existe certaines valeurs favorisant une amélioration de la ductilité, ce qui implique une flexibilité structurelle accrue.

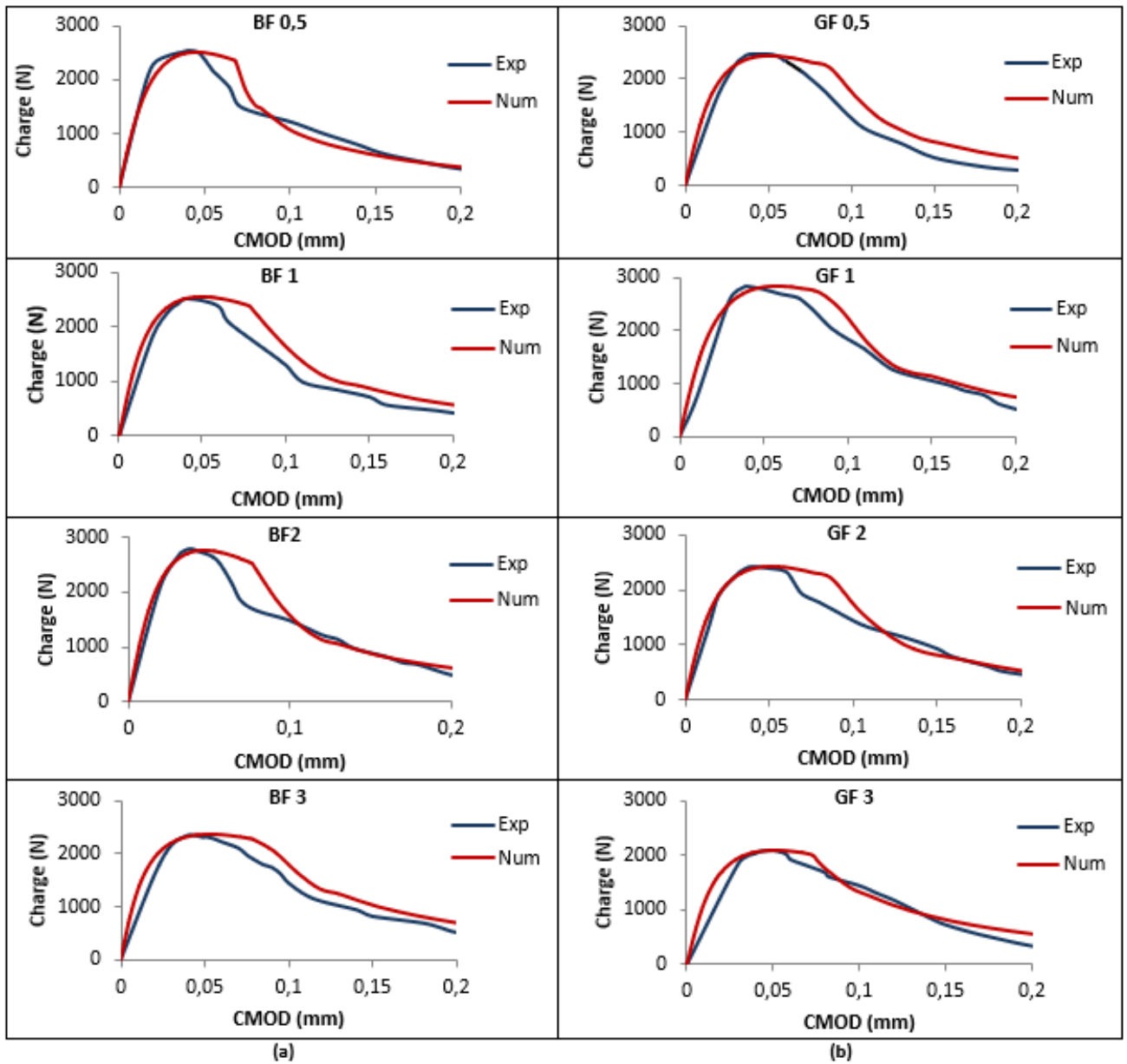


Figure IV. 8 : Résultats des simulations numériques et courbes expérimentales (Arslan, 2016) : Charge-CMOD pour les fibres de basalte (a) et les fibres de verre (b)

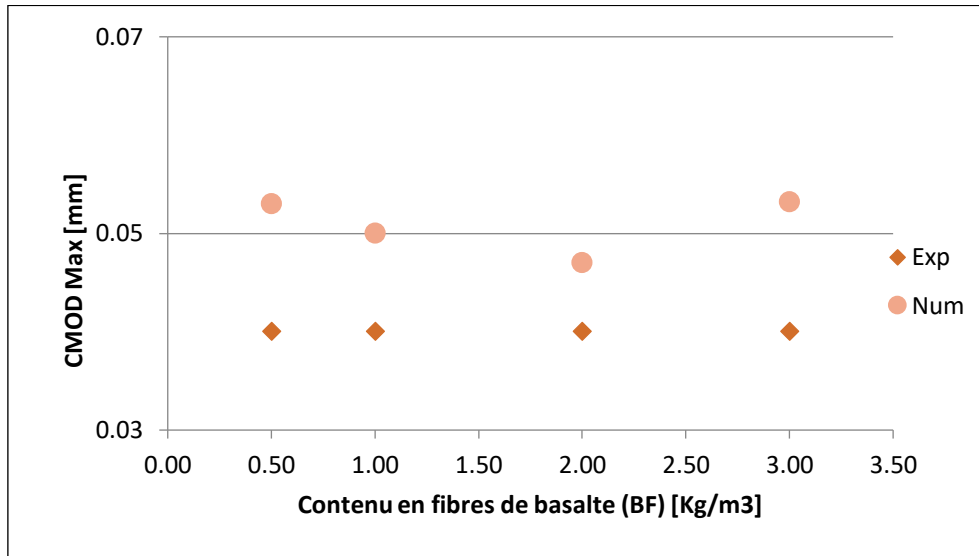


Figure IV. 9 : Courbes expérimentales (Arslan, 2016) et numériques de CMOD en fonction du contenu en fibres de basalte (BF)

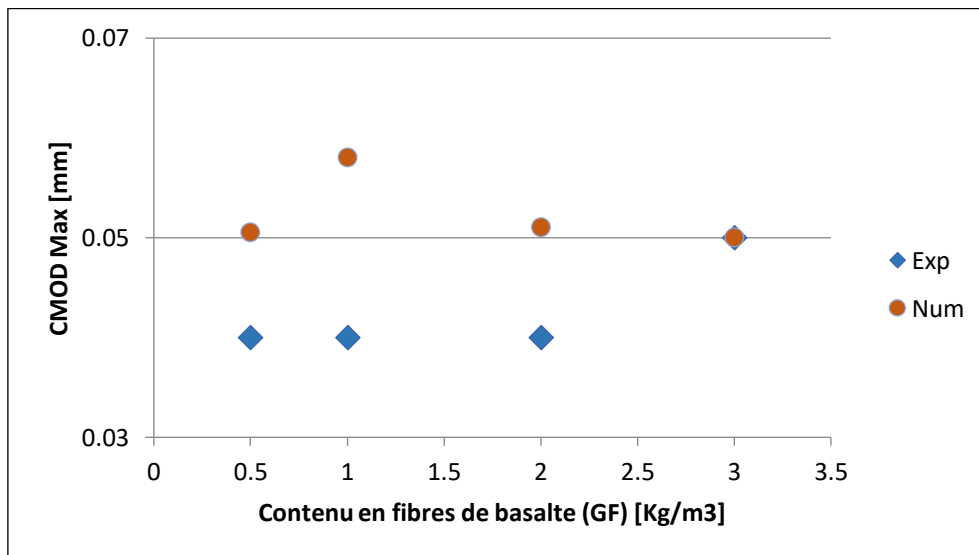


Figure IV. 10 : Courbes expérimentales (Arslan, 2016) et numériques de CMOD en fonction du contenu en fibres de verre (GF)

Lorsqu'on analyse les écarts numériques et expérimentaux représentés en **Figure IV. 10**, il devient évident que certaines tendances de convergence se dessinent entre les variations de remplacement des fibres de verre (GF). Par exemple, les substitutions GF0,5, GF1 et GF2 démontrent respectivement des rapports de 26,25 %, 45 % et 27,5 %, lesquels sont nettement plus marqués que le ratio calculé pour GF3 (0 %). Ce dernier présente une convergence quasiment nulle, puisque les valeurs de CMOD demeurent inchangées (CMOD = 0,05 mm).

IV.2.3.3 Effets de la longueur de fissure

L'énergie de rupture des bétons est intrinsèquement liée à l'adhérence interfaciale entre la pâte de ciment et les agrégats, ainsi qu'à la présence d'hétérogénéités dans la structure du béton. La présence d'agrégats issus de déchets favorise la propagation des fissures dans la matrice de béton en raison de la morphologie particulière de ces agrégats et de la différence de rigidité entre divers types de déchets. Dans cette partie, nous avons adopté des paramètres expérimentaux identiques ainsi que des géométries similaires pour les échantillons fissurés, en variant le rapport « α » qui représente la longueur de la fissure en proportion de la hauteur de la section transversale de l'échantillon (a/h), comme illustré dans la **Figure IV. 12**. Les entailles induisent une distribution de charge inégale, ce qui entraîne l'apparition de pics de contrainte ayant des répercussions sur la résistance mécanique des composants ou des structures.

Les courbes illustrées dans les **Figures IV. 11** et **IV.12** établissent de façon évidente que la charge maximale était directement proportionnelle à la valeur de « α ». À titre d'exemple, tous les échantillons en caoutchouc avec $\alpha=0,2$ ont montré une augmentation d'environ 70 % de la charge maximale, tandis que ceux avec $\alpha=0,6$ ont enregistré une réduction d'environ 48 %. Pour ce qui est des échantillons en verre et en basalte, nous avons observé une augmentation de l'ordre de 61 % lorsque la longueur de l'entaille a été réduite à 10 mm, et une diminution d'environ 54 % de la charge maximale dans le cas de l'augmentation de la longueur de fissure jusqu'à 50 mm. Cette relation peut être expliquée comme suit : l'augmentation de la longueur de fissure nécessite une énergie de rupture moins élevée et génère des valeurs plus importantes de déplacement et de CMOD. Nous pouvons également noter qu'à partir de ces résultats, la charge maximale présentée dans les **figures IV.11** et **IV.12** sera indépendante du type de déchet. L'erreur relative entre la charge maximale pour la longueur de fissure initiale et sa nouvelle longueur ne dépend ni de la granulométrie, ni du taux de déchet, mais elle est fonction de la longueur de l'entaille et de la taille de l'échantillon.

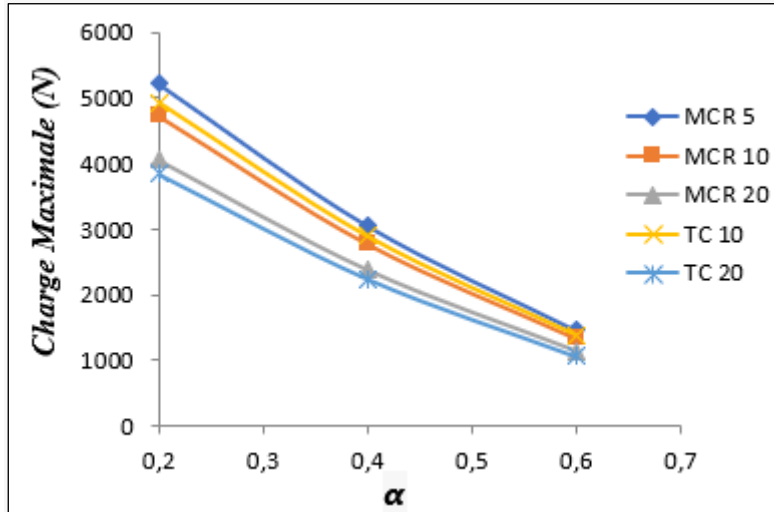


Figure IV. 11: La charge maximale en fonction de α (a/h) pour le béton avec des déchets de caoutchouc

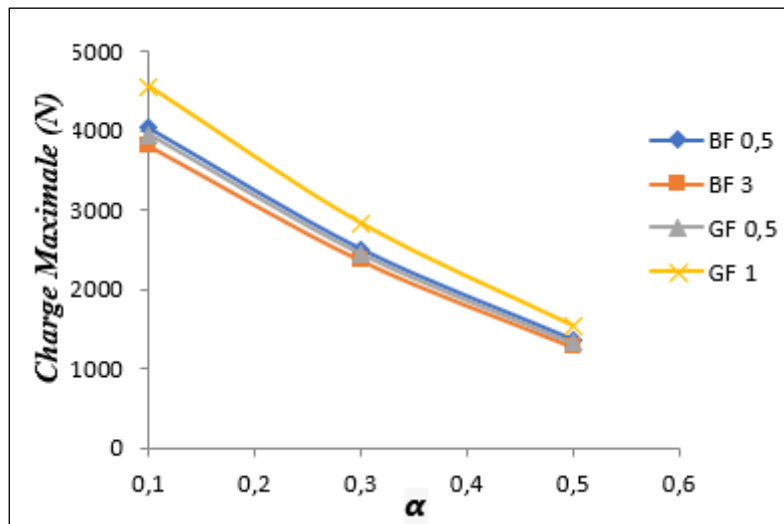


Figure IV. 12: La charge maximale en fonction de α (a/h), pour le béton avec des déchets de fibres de basalte (BF) et de fibres de verre (GF)

IV.2.4 Synthèse de la validation des résultats

Cette étude présente une analyse numérique visant à examiner le comportement à la rupture des poutres composites en béton soumises à un essai de flexion à trois points. Les résultats numériques obtenus sont sensibles à plusieurs paramètres, dont les facteurs les plus influents incluent, les dimensions des agrégats recyclés et leur morphologie, qu'ils soient intégrés à la formulation du béton en remplacement de l'agrégat naturel ou sous forme de fibres de renforcement. Les propriétés mécaniques des agrégats recyclés intégrés exercent une influence significative sur la réponse en flexion des poutres composites en béton testées, en englobant des aspects associés à la résistance, à la fragilité ou à la ductilité.

- L'introduction de déchets de caoutchouc et de pneus dans les mélanges de béton a un impact sur la rigidité Pré-Pic de la courbe charge-déplacement dans les investigations expérimentales et numériques. Notamment, les observations ont révélé une corrélation et une convergence remarquables au niveau de la charge maximale entre les courbes du modèle numérique et les essais expérimentaux. Par exemple, TC5 et MCR5 ont manqué les différentiels de capacité de charge les plus étroitement alignés entre les valeurs numériques et les essais expérimentaux. Nous avons également constaté que les simulations numériques produisaient des résultats plus fiables lorsque, la proportion de substitution par des déchets de caoutchouc était plus faible, indépendamment de la nature fine ou grossière des agrégats de substitution valorisés.
- Les valeurs numériquement calculées des charges maximales pour les éprouvettes de béton composites incorporant des copeaux de pneus concordent étroitement avec les résultats expérimentaux par rapport aux spécimens incorporant des granulats de caoutchouc. À l'exception de TC20 et MCR15, une augmentation du taux de remplacement des agrégats de caoutchouc, qu'il s'agisse de miettes ou de copeaux, s'associait à une augmentation à la fois des valeurs expérimentales et numériques de déplacements ultimes. MCR5 et TC20 ont montré la plus grande convergence entre les déplacements ultimes numériques et expérimentaux.
- L'intégration de fibres de verre et de basalte dans le mélange de béton a donné lieu à des courbes Charge-CMOD numériques plus étroitement comparables aux courbes expérimentales. En outre, les résultats numériques ont démontré qu'il n'y avait pas d'influence spécifique des types et des teneurs de fibres sur la capacité de charge maximale. Notamment, les éprouvettes BF3 et GF0,5 ont affiché l'écart le plus faible entre les résultats numériques et expérimentales. La convergence des valeurs optimales de CMOD a été remarquée pour le cas des éprouvettes de béton BF2 et GF3.
- La charge maximale s'est révélée directement proportionnelle à la longueur relative de la fissure α . L'erreur relative entre la charge maximale au niveau de la longueur de fissure initiale et la nouvelle longueur de fissure s'est avérée dépendante de la longueur de fissure et de la taille de l'échantillon, sans afficher de relation spécifique avec la granulométrie ou la proportion de déchets.

IV. 3 Modélisation Multi-échelle avec ABAQUS

Les phases de simulation sous ABAQUS englobent les procédures classiques de tout travail de modélisation, comprenant la géométrie d'échantillon, la définition des matériaux, les conditions limites, la modélisation des entailles ou de fissures et le maillage. La conduite de la simulation et l'examen des résultats pour l'analyse macroscopique et mésoscopique concernent principalement la représentation des granulats et des fibres.

IV.3.1 Approche macroscopique Vs Mésoscopique

L'étude actuelle a été menée afin de valider les résultats expérimentaux obtenus à l'aide du logiciel d'éléments finis ABAQUS, dans le but de comprendre les mécanismes internes et d'être en mesure de prédire le comportement des autres configurations tenant compte de l'ajout économique de coûts de calcul.

Les études expérimentales adoptées dans cette partie portent sur les propriétés mécaniques du béton géopolymère renforcé par différents types de fibres. Ces investigations examinent l'impact du dosage et de la longueur des fibres, ainsi que des types de fibres (acier, verre et polypropylène) utilisés, sur la résistance à la rupture, la capacité de flexion, la résistance au cisaillement et la ténacité globale du béton géopolymère. Dans ce travail récent, nous n'analysons que quelques cas en raison de la disponibilité des paramètres et de leur adéquation avec les buts de l'étude.

IV.3.1.1 Méthodes expérimentales

Dans le but de fournir une base à la validation numérique, les essais expérimentaux utilisés dans cette étude sont présentés ci-dessous :

Les auteurs dans (Zuaiter et al., 2023) ont évalué les performances en flexion et en cisaillement d'un béton géopolymère à base de laitier et de cendres volantes renforcé de fibres de verre (**GF**). Deux types de **GF**, de longueurs différentes (24 et 43 mm), ont été utilisés individuellement ou en combinaison hybride. Chaque type de **GF** a été incorporé individuellement à raison de **0,5**, **1,0** et **1,5** % en volume. Trois combinaisons hybrides de **GF** ont été ajoutées au béton géopolymère à une fraction volumique fixe de **1,0** %, avec des rapports fibres courtes/fibres longues de **3 :1**, **1 :1** et **1 :3**.

Les performances en flexion ont été évaluées par les courbes charge-déplacement, la résistance à la flexion, la déflexion maximale, les résistances résiduelles à la flexion, la ténacité à la flexion et le rapport de résistance équivalente à la flexion. Les propriétés mécaniques du

béton géopolymère ont été obtenues à partir d'essais de flexion quatre points sur des poutres prismatiques de taille (500x100x100) mm³ en béton géopolymère renforcé de fibre comme illustré sur la **figure IV. 13**.

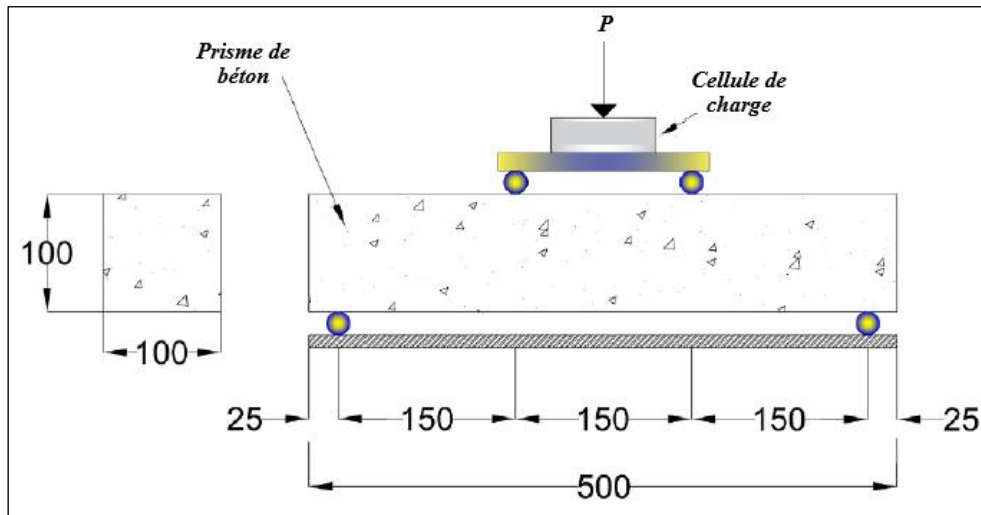


Figure IV. 13 : Représentation schématique d'essai de flexion quatre points (en mm) (Zuaitar et al., 2023)

L'étude menée par (Sadrumontazi & Kazemi Rad, 2024) s'intéresse aux paramètres de rupture du béton géopolymère, fabriqué en remplacement des granulats grossiers naturels avec la scorie volcanique (des roches légères et poreuses issues de projections volcaniques utilisées comme agrégats légers dans le béton) à différents pourcentages (70 %, 80 % et 90 %). Ce béton est renforcé par des fibres d'acier (0,5 %, 1 % et 1,5 %) et des fibres de polypropylène de 0,1 %. Un essai de flexion trois points a été réalisé sur les échantillons de poutres entaillées de dimension (840 x 100 x 100) mm³. Dans ce présent travail, nous nous focalisons sur l'étude macroscopique du béton géopolymère fabriqué à 70% de scories (SC 70 %) sans ajout de fibres, ainsi qu'une analyse mésoscopique de ce matériau en ajoutant les différents taux de fibres d'acier.

IV.3.1.2 Maillage éléments finis et conditions aux limites

Au cours de cette étude, une poutre entaillée en béton géopolymère renforcée de GF a été testée en flexion à quatre points, comme le montre la **figure IV. 13**. Cet échantillon de béton a été modélisé par des éléments solides tridimensionnels C3D8R, qui sont des éléments brique linéaires à 8 nœuds. Les fibres utilisées ont été représentées par des éléments treillis T3D2, qui sont des éléments linéaires à 2 nœuds. La technique "Embedded Region" dans Abaqus a été

adoptée pour modéliser l'interaction entre le béton géopolymère et les fibres, en créant une adhérence parfaite entre les matériaux (**Figure IV. 14**).

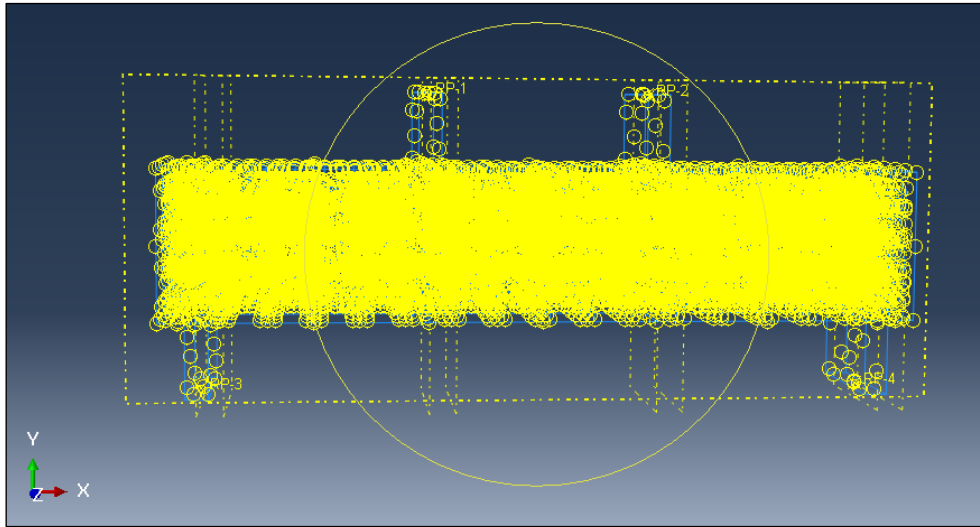


Figure IV. 14 : Interaction entre le béton géopolymère et les fibres de verre

Les résultats expérimentaux de (**Sadrmomtazi & Kazemi Rad, 2024**) ont été utilisés dans cette partie pour valider le modèle numérique proposé, les échantillons modélisés sont des poutres entaillées soumises à la flexion trois points, leur portée effective est de 800 mm et leur hauteur d'entaille est de 25 mm. La taille du maillage adoptée dans ce modèle était de 12,5 mm, qui est légèrement raffinée pour une représentation plus précise de l'entaille (**Figure IV. 15**). Dans ce modèle, le béton géopolymère a été présenté par des éléments solides tridimensionnels C3D8I qui sont des éléments brique à 8 nœuds avec modes incompatibles. Ces modes sont plus précis que C3D8R, en effet, ils ont un meilleur comportement dans les zones de concentration de contraintes, comme autour de l'entaille. Les fibres d'acier ont été représentées par des éléments treillis T3D2, qui sont des éléments linéaires à 2 nœuds. Le contact entre les matériaux est modélisé en utilisant une liaison par région incorporée comme illustrée sur la **figure IV. 16**.

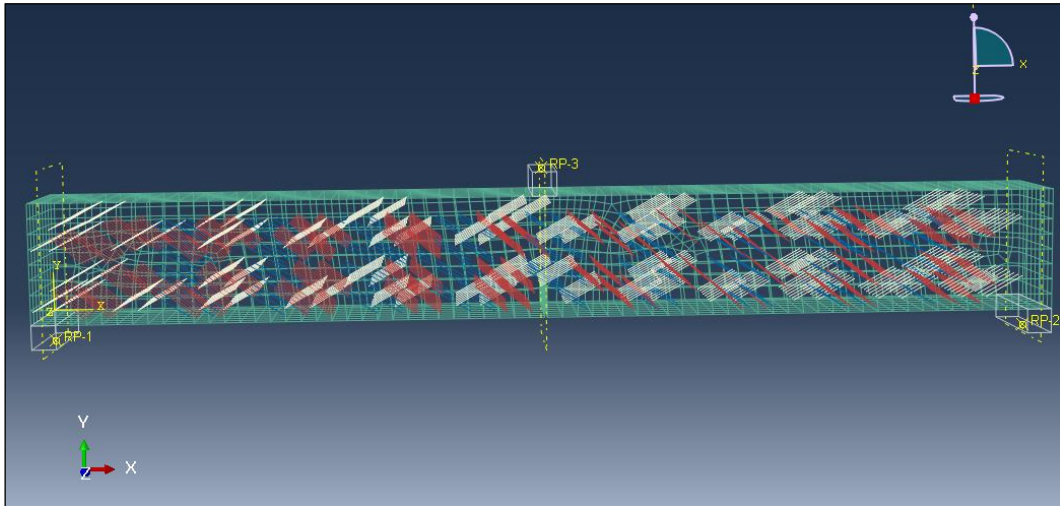


Figure IV. 15 : Maillage de la poutre et les fibres

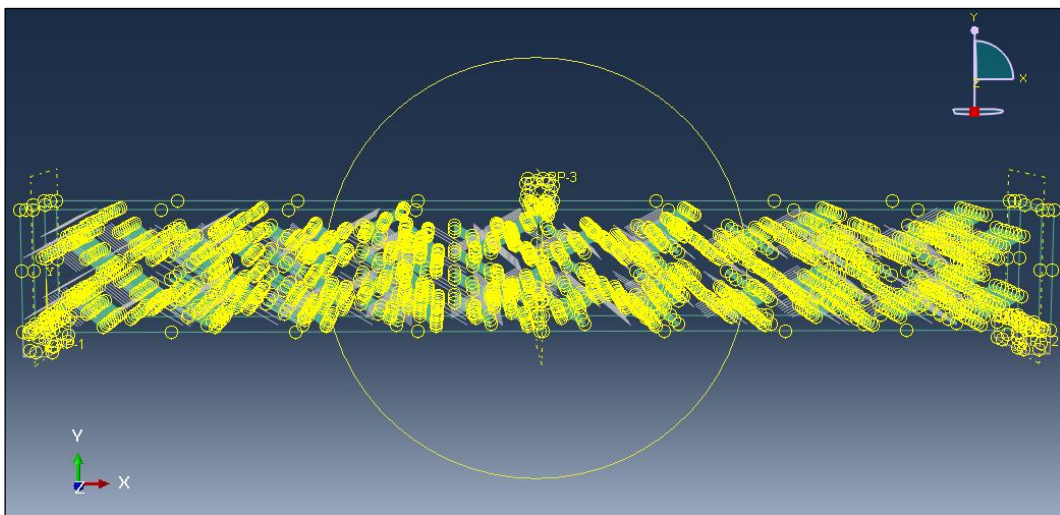


Figure IV. 16 : Interaction entre le béton géopolymère et les fibres de verre (GF)

IV.3.1.3 Validations et interprétation des résultats

Les nuages de points illustrés en **Figures IV.17 et IV.18** montrent la relation Charge-Déplacement pour le cas des bétons géopolymères composites permettent de comparer les résultats expérimentaux et numériques des différentes compositions.

L'étude paramétrique menée par (**Zuaiter et al., 2023**) sur les propriétés de béton géopolymère renforcé par des fibres de verre a été utilisée dans cette partie, par la modélisation de certains échantillons afin de valider le modèle analysé par ABAQUS.

La **Figure IV. 17** illustre une analyse comparative, Charge-Déplacement des résultats expérimentaux et numériques en tenant compte de l'influence de la longueur des fibres de verre sur le comportement mécanique des bétons renforcés.

Pour l'échantillon témoin (sans fibres), la rigidité initiale reste basse et la rupture se produit de manière fragile. Le calcul numérique par éléments finis donne généralement la tendance expérimentalement observée, même s'il sous-estime un peu la résistance maximale (différence d'environ 19 %), en raison du problème de description précise de la fissuration fragile de la matrice cimentaire.

Dans le cas de la formulation A0B100GF1 uniquement à base de longues fibres (43 mm), le pontage (crack bridging) des fissures est amélioré et la ductilité. Toutefois, l'écart atteignant 33 % entre résultats numériques et expérimentaux indique la difficulté de modéliser la distribution et l'orientation aléatoire des longues fibres dans la matrice cimentaire.

La combinaison A50B50GF1, conçue à la fois, de façon à équilibrer 50 % de fibres courts (23 mm) et 50 % de fibres longues (43 mm), présente une homogénéité et un bon équilibre de comportement. Les courtes fibres retardent l'initiation des fissures tandis que les longues, transmettent les efforts après fissuration. Le faible écart observé ($\approx 6\%$) suggère que le modèle prédit précisément correctement le comportement global de ce type de béton.

La composition A75B25GF1, ayant une proportion majoritaire de fibres courtes (75 %) et 25 % de fibres longues, est celle qui remporte le meilleur résultat. L'efficacité des fibres courtes dans le contrôle de la fissuration initiale, couplée à l'action complémentaire des fibres longues en post-fissuration, remet les résultats expérimentaux et numériques dans un très bon accord (écart $\approx 3,6\%$), et fait de cette configuration la proposition la plus stable et celle dont la modélisation prédit le mieux ce comportement.

Enfin, le dernier échantillon qui a le pourcentage le plus dominé de fibres longues (A25B75GF1) présente un bon comportement de pontage des fissures, mais un contrôle initial des microfissures moins marqué. L'écart entre l'essai expérimental et la simulation atteint 19%, ce qui signifie une moins grande précision du modèle dans cette disposition. Cette composition favorise la ductilité du béton ; elle demeure en général moins performante et moins prédite par la modélisation que la combinaison A75B25GF1.

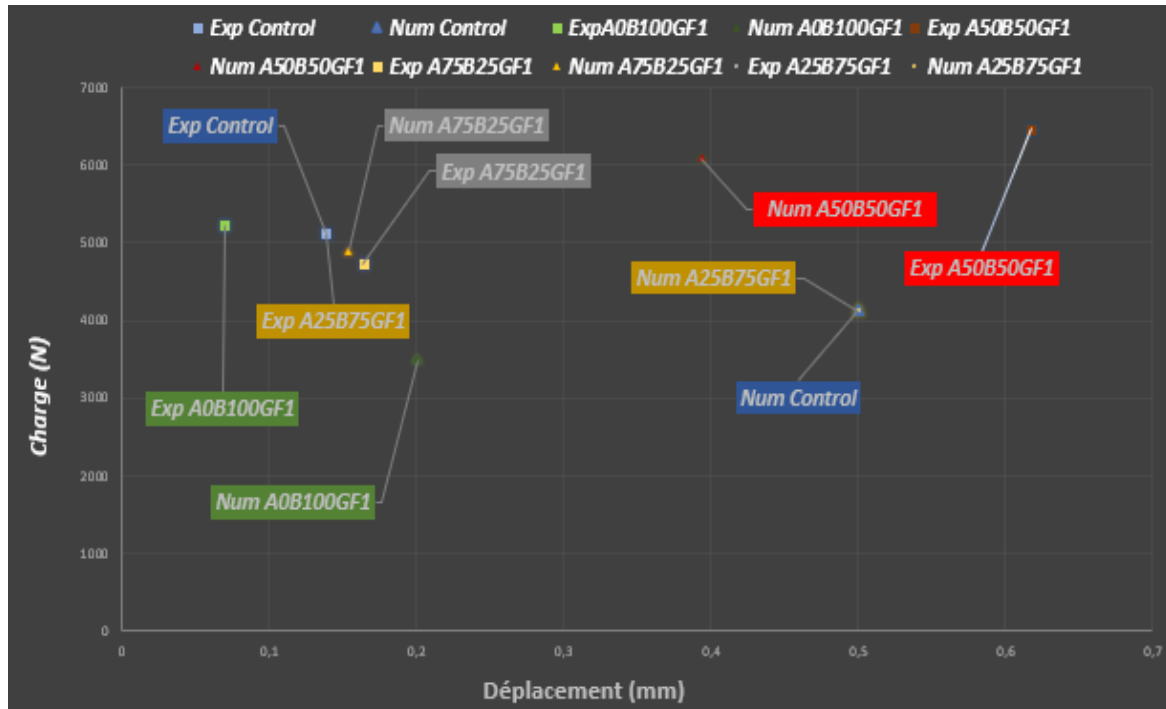


Figure IV.17 : Simulations numériques et résultats expérimentaux Charge/Déplacement (Zuaiter et al., 2023)

La **figure IV. 18** montre une comparaison entre les essais expérimentaux de (**Sadrmomtazi & Kazemi Rad, 2024**) et l'analyse numérique menée sous ABAQUS des différents échantillons de béton en géopolymère, l'échantillon sans fibres (SC70 Control) a été modélisé à l'échelle macroscopique, tandis que les échantillons renforcés par des pourcentages définis de fibres d'aciers (SC70 SF...) ont été analysés à l'échelle mésoscopique.

La première phase du béton témoin sans fibre montre une bonne cohérence entre les deux approches avec une légère divergence en charge maximale, ce qui implique que le modèle macroscopique décrit de manière satisfaisante le comportement global du béton de référence.

Pour l'échantillon renforcé par 0,5 % de SF (SC70 SF0,5), les résultats montrent une différence significative entre le calcul numérique et les tests expérimentaux. La charge prédite par ABAQUS est plus élevée par rapport à l'expérience, ainsi qu'une augmentation du champ de déplacement.

Cette divergence nécessite d'être expliquée par la modélisation mésoscopique, qui tend à surestimer l'effet favorable des fibres dans la résistance et la ductilité.

Concernant l'échantillon renforcé par 1% de fibre d'acier (SF) (SC70 SF1), la concordance entre les résultats expérimentaux et numériques est bonne, tant en termes de charge maximale

que de comportement global. La divergence reste limitée, et le modèle mésoscopique permet de reproduire précisément l'effet des fibres sur la capacité portante et la ductilité. Cette configuration peut donc être considérée comme la plus représentative, validant la fiabilité de la modélisation.

Contrairement à l'échantillon contenant 1,5 % de SF (SC70 SF1,5), la divergence entre la simulation et l'expérience devient plus prononcée. La charge fournie par le modèle numérique est supérieure à celle mesurée expérimentalement, ce qui est dû à la surestimation de l'effet du taux de fibre élevé. Comme nous l'avons dit, les hypothèses de la modélisation mésoscopique peuvent entraîner cette différence de résultats, qui ne prennent pas en compte certains phénomènes tels que la dispersion hétérogène des fibres, leur orientation aléatoire ou encore la perte d'efficacité mécanique à forte teneur en fibres.

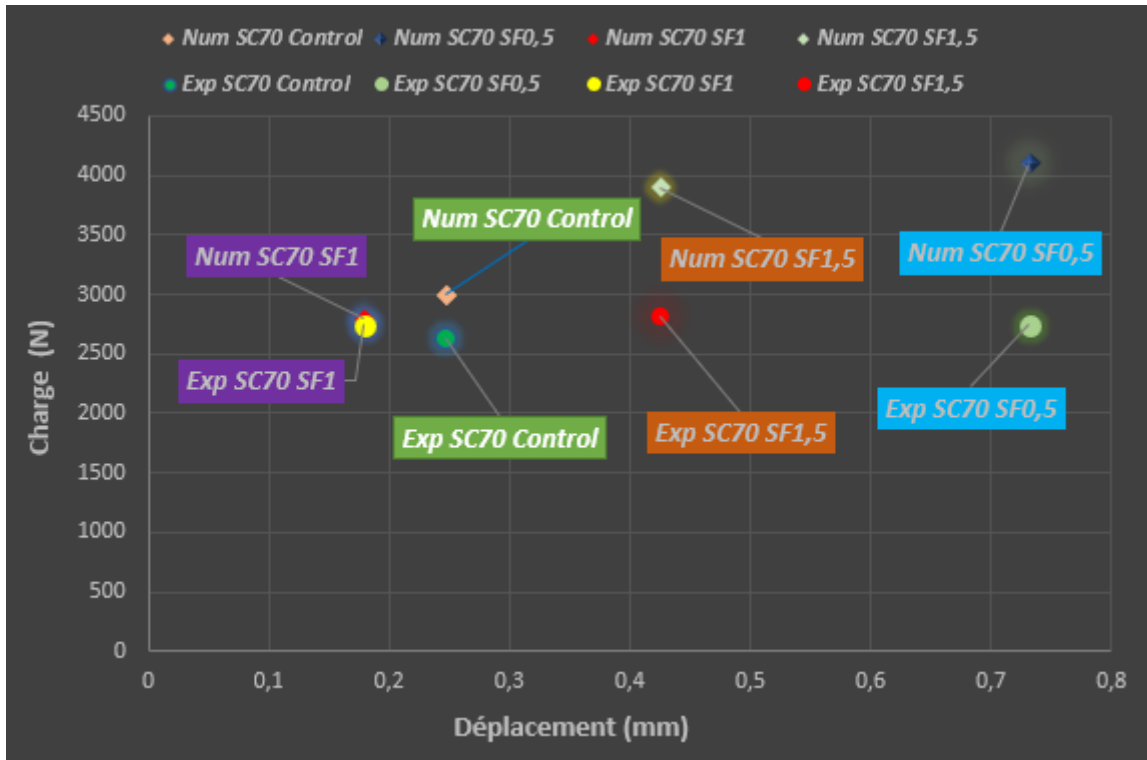


Figure IV.18 : Simulations numériques et résultats expérimentaux Charge/Déplacement (Sadrumontazi & Kazemi Rad, 2024)

IV.3.1.4 Synthèse de la validation des résultats

Pour synthétiser, il ressort de la comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques du béton géopolymère renforcé par des fibres d'acier que le modèle macroscopique reproduit correctement le comportement global du béton témoin sans fibres, alors que la modélisation

mésoscopique aboutit à une surestimation de l'apport des fibres d'acier, notamment pour les taux élevés. Cela atteste que la limite des hypothèses de la modélisation numérique considérée, et ne rend que plus nécessaire, d'être rigoureux dans la prise en compte de paramètres tels que la distribution, l'orientation, l'efficacité réelle des fibres, pour qu'elle participe efficacement à l'augmentation de la performance mécanique recherchée.

L'étude démontre que la longueur et la combinaison des fibres ont un effet notable sur le comportement du béton renforcé. Les fibres courtes contrôlent bien l'initiation de fissures et les fibres longues assurent le pontage post-fissuration. Le meilleur compromis est obtenu avec la formule A75B25GF1, où on observe le minimum d'écart entre les résultats expérimentaux et numériques ($\approx 3,6\%$). Les mélanges sans fibres longues accroissent la ductilité mais sont moins prédits par le modèle, alors que les formulations équilibrées ou riches en fibres courtes sont plus à l'évidence numérique-expérimentale.

IV.3.2 Approche mésoscopique avec la méthode de distribution PI (π)

L'étude numérique a été menée sur des échantillons fissurés/non-fissurés de béton armé (**RC**) ou fibré (**FRC**) incorporant des déchets de construction et de démolition comme granulats recyclés (**RA**) dans la composition du béton. Ces échantillons ont été évalués afin d'explorer les propriétés de rupture de ces matériaux, à l'aide de la méthode de distribution Pi (**PDM**). La PDM est basée sur la distribution non aléatoire des granulats.

IV.3.2.1 Méthodes expérimentales

La **figure IV. 19** illustre la géométrie de la poutre testée, de section carrée, d'une profondeur de 300 mm et d'une longueur totale de 2 000 mm. La configuration topologique des barres d'armature longitudinales et des étriers de cette éprouvette de béton armé est clairement illustrée sur la **figure** suivante.

Le **tableau IV.1** récapitule les propriétés mécaniques du béton armé. Dans cette étude, une taille de granulat (**RA**) a été utilisée sous forme de cylindre de 20 mm de diamètre et d'épaisseur. Les RA ont été utilisés comme granulats grossiers en les ajoutant au béton à l'aide du modèle de plasticité endommageable du béton (**CDP**) comme indiqué dans le **tableau IV.2**.

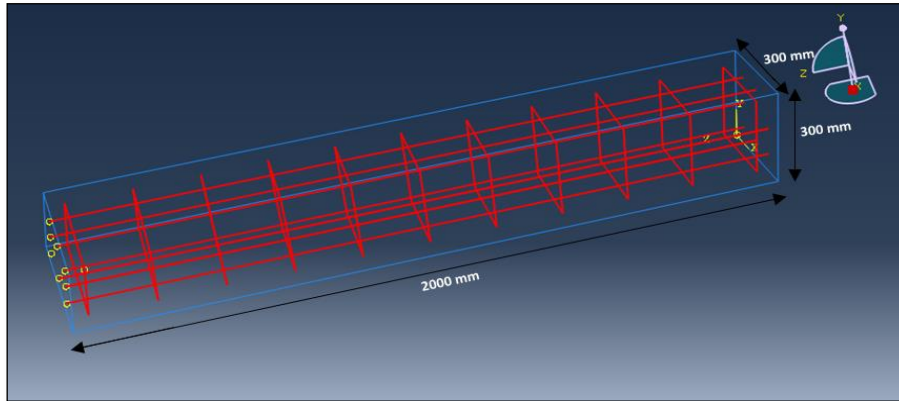


Figure IV. 19: Géométrie de l'échantillon de poutre en béton armé

Tableau IV.1: Propriétés mécaniques de poutres en béton armé (RC)

	Modulus d'élasticité (MPa)	coefficient de Poisson
RA	10 000	0.20
Barre d'acier	205 000	0.30
Béton	17 585	0.17

Tableau IV.2: Paramètre de plasticité de béton de RA.

Excentricité	Fb0/Fc0	K	Parameters de viscosity
0.1	1.16	0.667	0.001
Comportement en compressive		Comportement en traction	
Limite d'élasticité	Deformation Inélastique	Limite d'élasticité	Déformation Inélastique
10	0	1	0
8	0.0015	0.05	0.0002
6	0.0025	-	-
4	0.004	-	-

Dans cette deuxième étude, la modélisation mésoscopique par EF est réalisée par ABAQUS pour étudier le modèle de rupture et les réponses mécaniques d'éprouvettes entaillées renforcées de fibres. La PDM est utilisée pour distribuer/localiser les granulats afin de construire le modèle mésoscopique structurel de l'éprouvette de béton renforcé (RC). Dans cette partie, des poutres entaillées ont été testées. La Figure IV.20 montre la taille géométrique de l'éprouvette, qui a une hauteur de 100 mm, une longueur de 500 mm et une profondeur négligeable, avec une entaille de dimensions 10 mm sur 30 mm. Les propriétés mécaniques des matériaux sont

mentionnées sur le **tableau IV.3**. Des granulats de béton recyclé (**RCA**) ont été utilisés comme granulats grossiers en les ajoutant au mortier à l'aide CDP. Les détails sont donnés dans le **tableau IV.2**. Dans cette étude, les auteurs ont à trois tailles différentes de RA, telles que 5, 10 et 20 mm. Ensuite, des fibres d'acier (10 mm) ont été incorporées et réparties aléatoirement sur la poutre.

Tableau IV.3: Propriétés mécaniques des matériaux de poutres en béton renforcé de fibres

	Elastic modulus (MPa)	Poisson Ratio
RA	10 000	0.2
Steel Fibers	200 000	0.3
Mortar	40 000	0.15



Figure IV. 20 : Géométrie de la poutre entaillée

IV.3.2.2 Maillage élément finis et conditions aux limites

Dans cette partie, l'étude effectuée sur l'échantillon de béton armé (**RC**) à base de granulats recyclés (**RA**) ; la **figure IV. 21** illustre les conditions aux limites de la poutre. La poutre est appuyée à sa première extrémité, tandis que l'autre extrémité est soumise à une force uniforme dans la direction vertical (y). La distribution des granulats a été réalisée par la méthode PDM (**Dilbas, 2021**). Sur la base de résultats expérimentaux, cette méthode a été proposée pour définir l'emplacement des granulats dans le béton, comme illustré à la **figure IV. 22**. Le maillage utilisé dans cette étude est de 10 mm sur l'ensemble du modèle. Un élément solide 3D (C3D8R) a été utilisé pour modéliser le béton, qui est un élément de brique linéaire à huit nœuds. Les interactions aux interfaces entre les agrégats recyclés de la matrice de mortier et les armatures ont été prises en compte en utilisant la technique de la région encastrée afin d'éviter de modéliser explicitement le contact interfacial ou le comportement cohésif, où les degrés de

liberté des nœuds encastrés sont contraints de suivre le mouvement interpolé de la matrice de mortier.

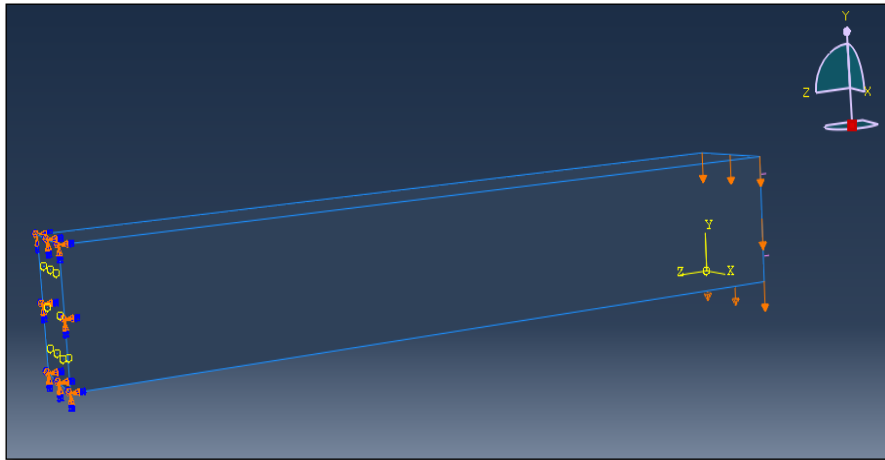


Figure IV. 21 : Conditions aux limites et chargement sur la poutre

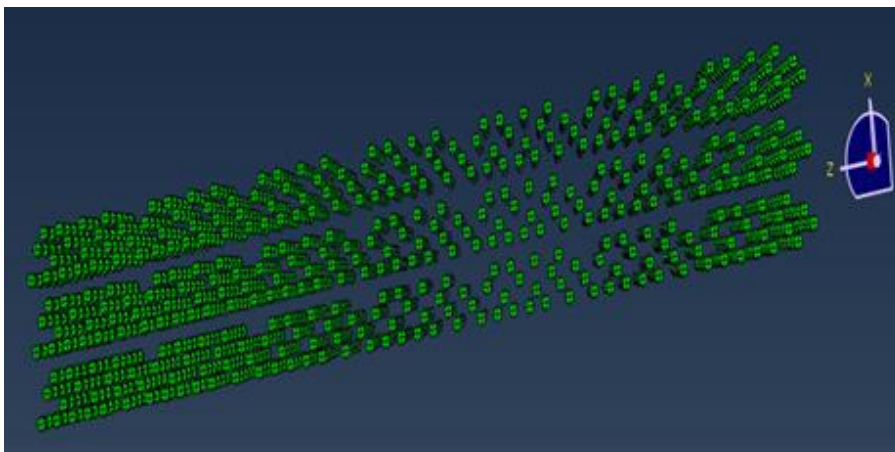


Figure IV. 22 : Distribution de granulats de béton recyclés par la PMD

Dans la deuxième partie de l'étude, une poutre entaillée en béton à base de déchets d'agrégats recyclés (**RA**), renforcée par des fibres (**FRC**), a été examinée en flexion trois points. Seule la moitié de la poutre a été modélisée. Compte tenu de la symétrie des échantillons, la poutre est fixée sur le côté gauche, comme le montre la **figure IV. 23**. La partie symétrique est également définie comme contrainte dans la direction « z » dans cette région. La distribution des agrégats a été réalisée à l'aide de la PDM, afin de définir l'emplacement des agrégats dans le béton. Le maillage de la poutre est basé sur des éléments quadrilatéraux, et la taille du maillage FE est d'environ 6 mm pour l'ensemble des parties du modèle. Une analyse du maillage a été réalisée afin d'étudier la sensibilité de la taille des éléments sur la précision des calculs, en utilisant trois tailles de maillage différentes : grossière, moyenne et fine (2,6 et 12 mm). La liaison entre les

interfaces de la matrice de mortier, RA et les fibres a été discrétisée en utilisant la région intégrée aux interfaces d'interaction, comme illustré à la **figure IV. 24**.

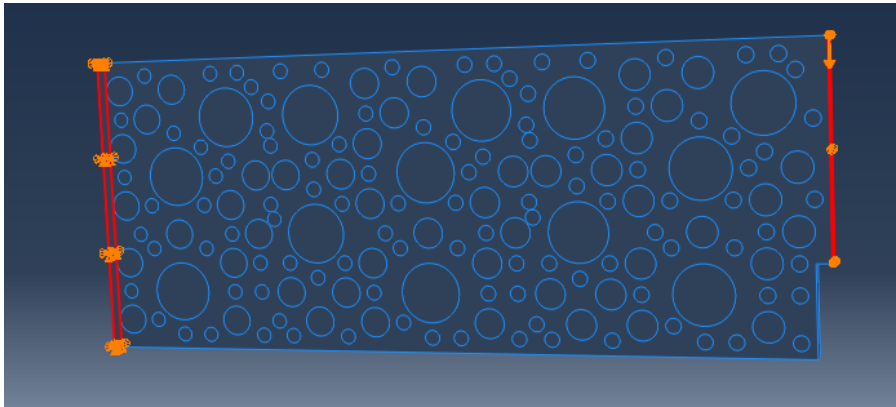


Figure IV. 23: Conditions aux limites et chargement

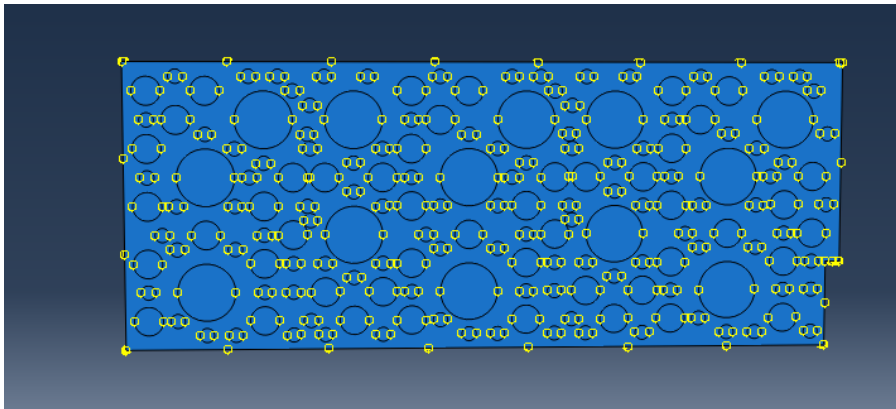


Figure IV. 24: Interaction entre agrégats, fibres et la pâte cimentaire

IV.3.2.3 Validation du modèle proposé

Comme le montre la **figure IV. 25**, la rigidité élastique linéaire de l'échantillon de béton armé avant la charge maximale (Pré- Pré) est plus faible lorsque les agrégats recyclés **RA** sont ajoutés, en raison de la rigidité plus faible du RA par rapport au cas **NA**. La charge maximale des échantillons est presque identique, avec une légère différence dans la poutre avec **RA** en raison de la faible capacité de charge des agrégats recyclés (**RA**) par rapport aux agrégats naturels (**NA**). Le **RA** peut contenir des résidus de mortier provenant d'une utilisation antérieure, ce qui peut réduire l'adhérence entre les granulats et la pâte de ciment. L'échantillon de béton avec **RA** présente des déformations plus importantes à la charge maximale que celui avec agrégats naturels (**NA**). Le **RA** a un module d'élasticité inférieur à celui du **NA** en raison de sa porosité élevée et de sa rigidité faible. Il est aussi ductile, ce qui lui permet d'absorber davantage de contraintes avant la rupture (**Figure IV. 26**).

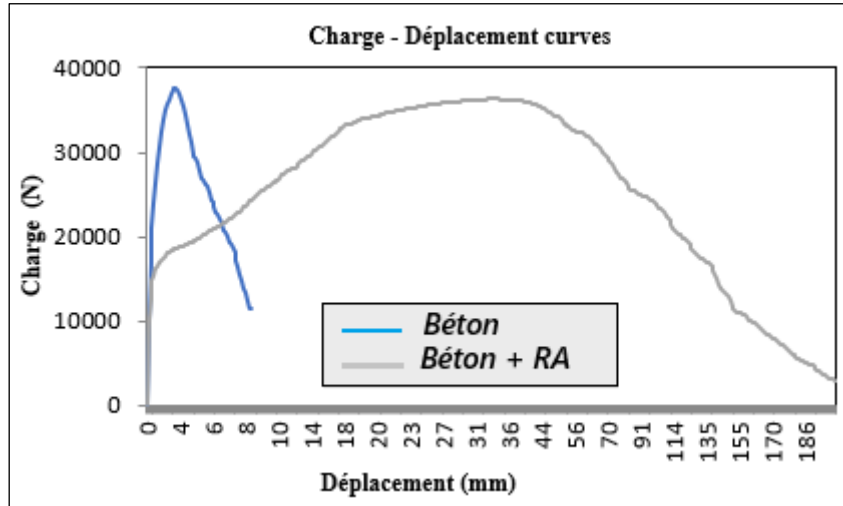


Figure IV. 25 : Réponse charge-déplacement d'échantillons de béton armé avec et sans RA

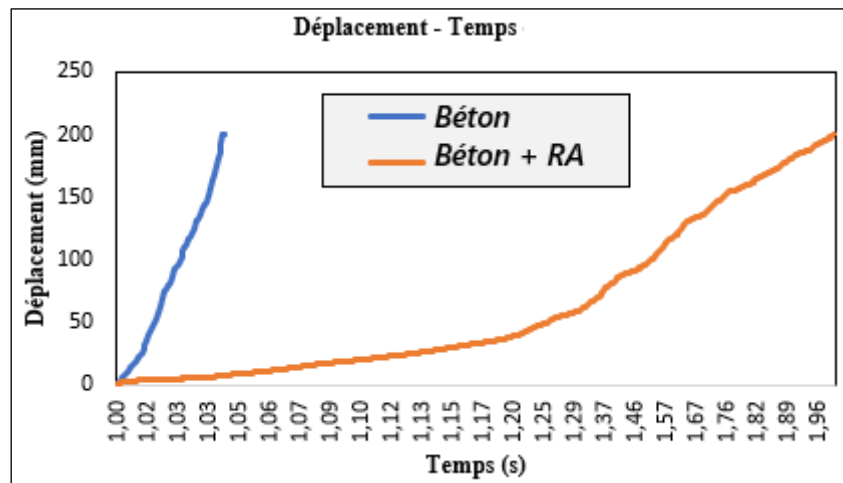


Figure IV. 26 : Courbes déplacement-temps du béton armé avec et sans RA

Comme le montre la **figure IV. 26** ci-dessus, les courbes de déplacement-temps du béton armé avec et sans RA révèlent une amélioration significative du comportement mécanique grâce à l'ajout des **RA**. La courbe du béton avec **RA** (orange) montre une augmentation progressive du déplacement avec le temps, indiquant une ductilité et une capacité d'absorption d'énergie accrues. Ce comportement suggère que le **RA** contribue à un mécanisme de transfert des contraintes plus réparti, retardant ainsi l'apparition de la rupture.

En revanche, la courbe du béton sans **RA** (bleu) présente une augmentation plus forte du déplacement, reflétant un comportement fragile et une ductilité limitée. Ce comportement correspond à la réponse attendue du béton traditionnel dans des conditions de charge similaires, où la rupture survient rapidement après avoir atteint la contrainte maximale.

Les résultats révèlent le rôle bénéfique du **RA** dans l'amélioration des performances structurelles du béton en renforçant sa capacité à subir des déformations plus importantes avant la rupture. Cette caractéristique est particulièrement précieuse dans les applications nécessitant une dissipation d'énergie et une résilience sous des charges dynamiques ou sismiques.

La partie plastique de la courbe charge-déplacement joue un rôle crucial dans la compréhension du comportement du matériau après la rupture. Cette région de la courbe correspond à la phase pendant laquelle le béton continue à se déformer même après la fissuration ; on constate aussi que la poutre avec **RA** présente des valeurs plus élevées que la poutre sans **RA**. Ces agrégats, qui agissent comme un renfort supplémentaire, permettent aux matériaux de bien résister et, par conséquent, offrent une interaction significative des agrégats avec la matrice cimentaire.

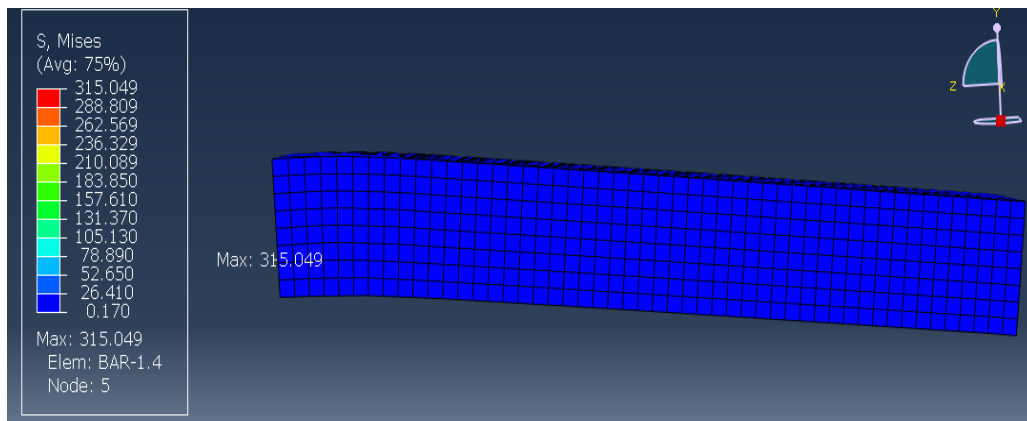


Figure IV. 27 : Répartition des contraintes de Von Mises dans les poutres en béton avec des agrégats naturels (**NA**)

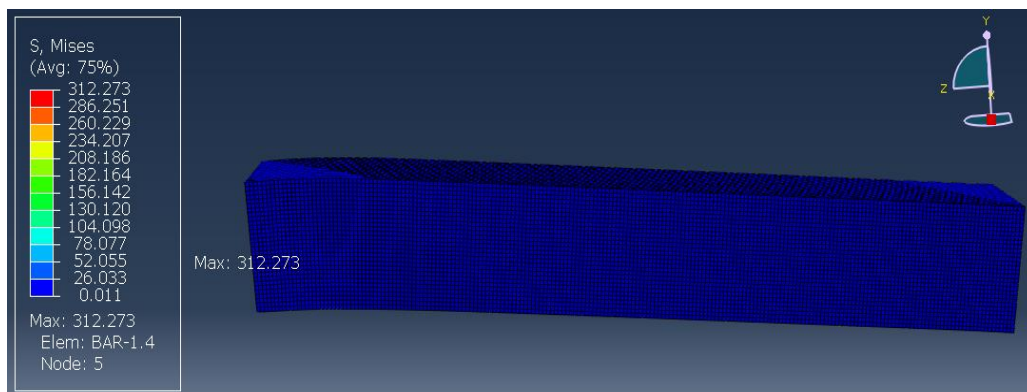


Figure IV. 28 : Répartition des contraintes de Von Mises dans les poutres en béton avec des agrégats recyclés (**RA**)

Les **figures IV.27 et IV.28**, permettent de comparer la répartition des contraintes dans les poutres en béton armé avec des granulats naturels (**NA**) et recyclés (**RA**). La répartition des

contraintes dans le béton conventionnel suit la théorie standard de la flexion : par rapport à l'axe neutre de la poutre. Le changement se produit lorsque l'on remplace le **NA** par du **RA** ; la porosité élevée des **RA** entraîne une diminution de la résistance à la compression, et le transfert des contraintes est affecté par la diminution de la rigidité de la matrice de mortier, comme le montre la **Figure IV.28**. La valeur de la contrainte maximale est légèrement inférieure dans la poutre avec du **RA**.

Les deux cas montrent clairement que les barres d'armatures supportaient toujours la partie majeure de la contrainte de traction ; la contrainte de compression dans le cas de présence des agrégats recyclés (**RA**) est localisée au niveau de la liaison faciale la plus faible.

Pour le cas du béton à granulats recyclés renforcé par des fibres d'acier, les résultats de la **Figure IV. 29** montrent que la rigidité élastique linéaire des échantillons avant la force maximale est légèrement élevée par l'ajout de fibres (**SF**). Ces fibres d'acier améliorent la réponse du matériau en absorbant une partie de la charge appliquée et contribuent également à une redistribution plus uniforme des contraintes dans la matrice cimentaire. Cela peut entraîner une augmentation de la rigidité élastique linéaire du matériau composite, ce qui signifie qu'il faudra une force plus importante pour obtenir une déformation donnée par rapport à un matériau non renforcé. La force maximale des échantillons est plus remarquable au pic, l'échantillon qui comprenait du **RA** et des fibres d'acier ayant une charge maximale plus élevée (136 N) que celle de l'échantillon qui comprenait du **RA** (130 N). Dans la **Figure IV. 29**, la partie plastique joue un rôle crucial dans la compréhension du comportement post-rupture du matériau ; on remarque que la poutre renforcée par fibres d'acier a des valeurs de charge plus élevées que la poutre avec **RA**. Cette région de la courbe correspond à la phase où le béton continue à se déformer même après la formation des fissures.

La différence entre les courbes des poutres comprenant du **RA** et du **RA** + fibres d'acier (**SF**) montre que l'interaction des fibres avec la matrice cimentaire est significative. Par conséquent, les fibres agissant comme des renforts dispersés permettent aux matériaux de bien résister. La **figure IV.30** illustre les résultats de l'analyse en termes de charge-CMOD (Crack Mouth Opening Displacement) pour les échantillons avec **RA** et **RA** + fibres d'acier. Cette figure montre que l'échantillon (**RA** + fibres d'acier) présente une charge nettement plus élevée au pic par rapport à l'échantillon avec **RA**. De plus, le CMOD est plus élevé pour l'échantillon **RA** + fibres d'acier que pour l'échantillon **RA**. Ce résultat est dû à la capacité des fibres à retenir la fissure et à offrir une résistance à la propagation de ces fissures. Par conséquent, la fissure se propage davantage avant que la rupture se produise.

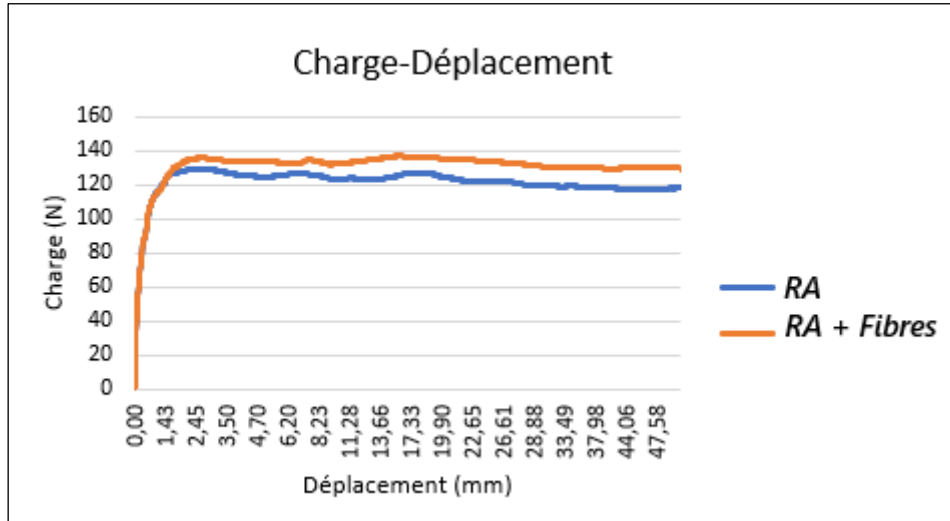


Figure IV. 29 : Réponses charge-déplacement d'échantillons de béton avec RA et RA + Fibres (SF)

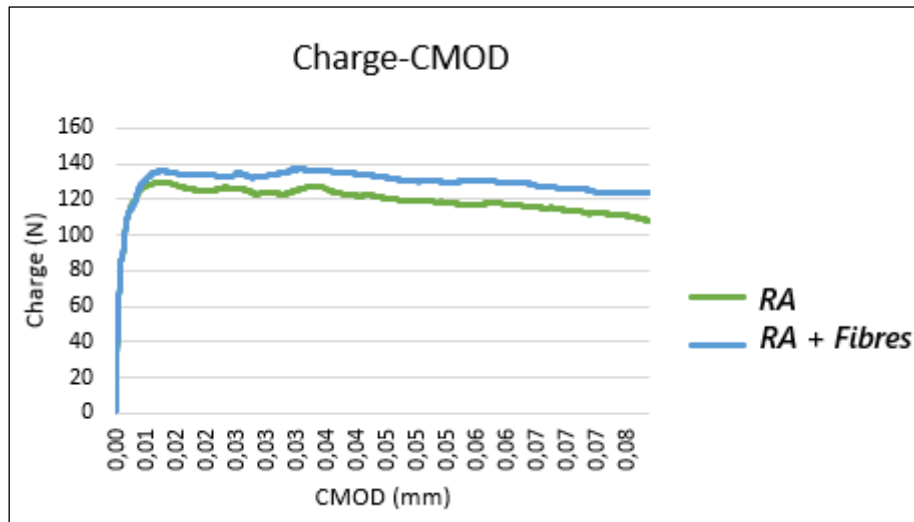


Figure IV. 30 : Réponses charge-CMOD des échantillons de béton avec RA et RA + Fibres (SF)

L'ajout de RA et de fibres d'acier à la composition du béton améliore la résistance à la traction grâce à la nature élastique des granulats recyclés et de l'acier (**Hameed et al., 2023**).

De plus, les fibres d'acier peuvent se déformer avant de se rompre, ce qui leur permet de subir des déformations plus importantes. En revanche, les fibres d'acier ne présentent pas de pores, ce qui signifie qu'elles ont une structure compacte (**Beddar, 2005**). Ces fibres ont une résistance à la compression supérieure à celle du RA et un module d'élasticité relativement élevé aussi, ce qui les rend plus rigides. Les fibres jouent également un rôle de renforcement dans le béton, ce qui réduit la propagation des fissures sous charge, entraînant une propagation minimale des fissures. Tout cela peut conduire à des courbes charge-déplacement et charge-CMOD plus

importantes, indiquant une meilleure capacité du matériau à résister aux charges tout en conservant une déformation progressive avant la rupture.

La courbe de la **figure IV. 31** représente la relation entre la taille du maillage (**EF**) et la déflexion de la poutre sous une charge de 120 N, ce qui permet de vérifier la convergence du maillage. En effet, la réduction de la taille du maillage augmente considérablement les déflexions, ce qui implique une sensibilité accrue du modèle au raffinement du maillage.

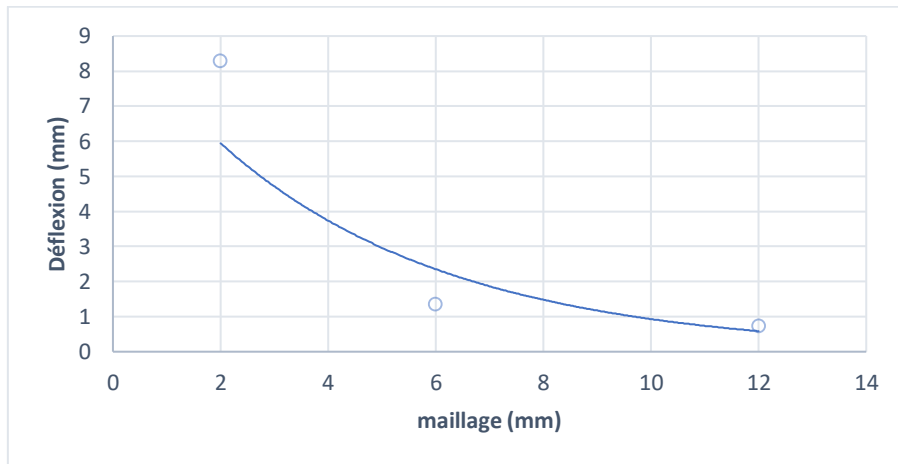


Figure IV. 31 : Courbe déflexion-taille des maillages d'échantillons de béton avec granulats recyclés (**RA**)

L'énergie élastique et l'énergie plastique ou dissipée ont été obtenues en calculant l'aire sous la courbe dans la région élastique, où le matériau se déforme de manière élastique, et dans la région plastique, où le matériau se déforme de manière permanente (**CASANOVA, 1995**). Les résultats des énergies élastiques et plastiques pour les échantillons avec **RA**, **RA + fibre d'acier** ainsi que le module d'élasticité sont présentés dans le **tableau IV.4**.

Tableau IV.4 : Propriétés mécaniques de la poutre

Énergie Élastic [N/mm]	Énergie Plastique [N/mm]	
	RA	RA + Fibres
64.9	6083.1	6515.6

Les **figures IV. 32 et IV.33** montrent la répartition des contraintes dans les deux directions *x* et *y* (**S11** et **S22**, respectivement) pour les échantillons contenant du **RA** et du **RA + fibres d'acier (SF)**. Il ressort clairement de la figure que les parties soumises à la traction présentent les valeurs maximales de contrainte.

L'ajout de fibres d'acier a contribué à la redistribution et à l'uniformisation des contraintes le long de la section transversale de la poutre, réduisant ainsi les concentrations de contraintes en des points spécifiques, comme le montrent les **figures IV.32 (a) et IV.33 (a)**. Dans ces mêmes figures, il convient de noter que les valeurs maximales et minimales des contraintes ne sont pas

illustrées sur la face de la poutre, mais se rapportent plutôt aux fibres d'acier. Les contraintes dans les fibres d'acier contribuent à leur capacité à renforcer le béton et à améliorer les performances de résistance de la poutre.

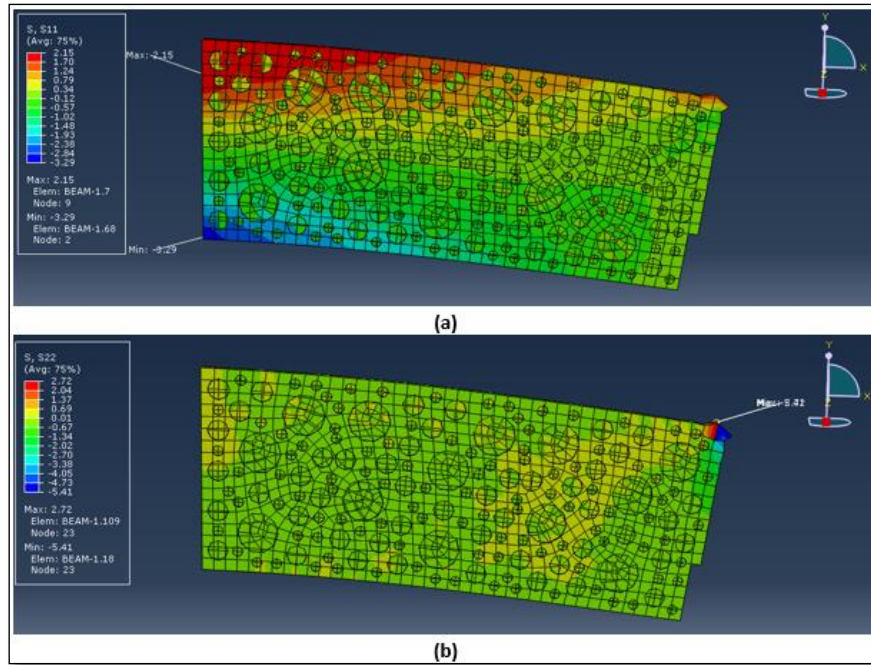


Figure IV. 32 : Répartition des contraintes des échantillons de béton avec RA dans la direction x (a) et la direction y (b)

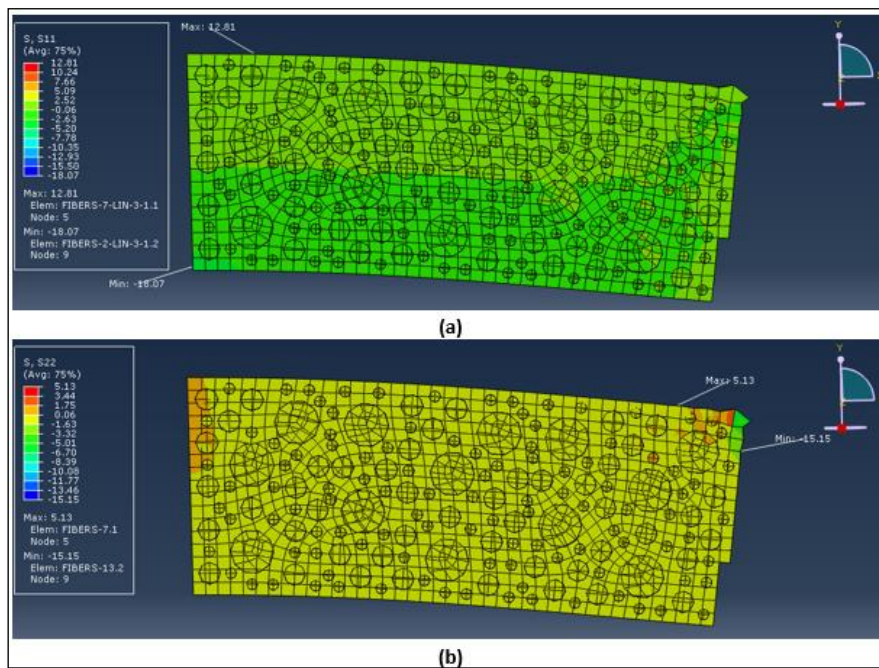


Figure IV. 33 : Répartition des contraintes des échantillons de béton avec RA + fibres dans la direction x (a) et la direction y (b)

La **figure IV. 32** permet également de constater la présence de contraintes autour de la zone de transition interfaciale (ITZ) entre le RA et le mortier, où les contraintes sont plus importantes dans certaines parties que dans d'autres. Les discontinuités au niveau de l'ITZ peuvent entraîner des concentrations de contraintes et une répartition inégale des contraintes dans cette zone.

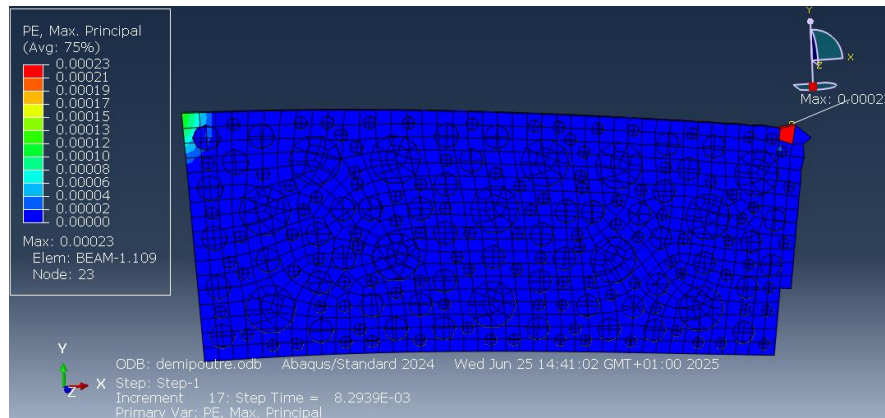


Figure IV. 34 : Modèles de rupture de la poutre en béton armé au stade final de chargement

En traçant la déformation plastique maximale, qui représente un bon indicateur de fissuration, clairement illustrée à la **figure IV. 34**, où les zones situées au-dessus indiquent le début de l'amorçage des fissures. La zone rouge montre les endroits où la déformation dépasse le pic.

IV.3.2.4 Synthèse de la validation des résultats

Dans cette partie, une nouvelle approche est adoptée de distribution π pour la répartition RA dans des échantillons de béton. Les poutres sont modélisées à l'aide du logiciel ABAQUS à une échelle mésoscopique. Les conclusions suivantes peuvent être résumées comme suit :

- La porosité élevée des granulats RA et leur faible adhérence à la matrice de ciment ont pour effet de réduire le module d'élasticité et la rondeur par rapport aux granulats NA, ce qui contribue à un déplacement plus important.
- Les RA sont généralement plus ductiles ; ils absorbent davantage les contraintes avant la rupture, ce qui se traduit par une augmentation des déformations à la charge maximale.
- Les RA jouent un rôle de renforcement, améliorant la résistance des matériaux même après fissuration.
- L'ajout de fibres au RA contribue à l'augmentation de la rigidité élastique linéaire avant l'atteinte de la force maximale en améliorant la réponse du matériau grâce à l'absorption d'une partie de la charge appliquée et contribuant aussi à une redistribution plus uniforme des contraintes dans la matrice cimentaire.

- La force maximale des échantillons est la plus remarquable pour le cas de RA+ fibres d'acier, car cela améliore la ductilité du béton grâce à l'interaction significative entre les fibres et la pâte cimentaire.
- L'incorporation de fibres d'acier dans le béton affecte la partie plastique des courbes charge-déplacement et charge-CMOD. La poutre avec fibres présente des valeurs de charge maximale plus élevées que la poutre avec RA seulement, ce qui signifie que l'interaction des fibres avec la matrice de ciment est importante et que les fibres agissent comme un renfort dispersé, permettant aux matériaux de bien résister.
- Les courbes de charge-CMOD montrent que l'échantillon (RA + fibres d'acier) présente une charge significative au pic par rapport à celle du RA. De plus, le CMOD maximal est plus prononcé pour le cas du RA + fibre d'acier que celui de l'échantillon avec RA, cela est dû à la capacité à s'ouvrir davantage avant la rupture, ce qui signifie que les fibres peuvent retenir la fissure et permettre ainsi au matériau de résister aux charges tout en conservant une déformation progressive avant la rupture.
- Les fibres d'acier permettent la redistribution et l'uniformisation des contraintes sur toute la poutre en absorbant une partie des contraintes, puis en les transmettant uniformément au matériau. Les contraintes dans les fibres d'acier contribuent à renforcer le béton et à améliorer les performances de la poutre en termes de résistance.
- La discontinuité des matériaux entre le mortier et le RA dans les zones ITZ peut entraîner de concentration de contraintes et une répartition inégale de ces contraintes dans cette zone. Ces discontinuités apparaissent en raison des différentes propriétés des matériaux ou de la légère interaction entre le mortier et le RA, ce qui entraîne finalement des concentrations de champs de contraintes affectant l'intégrité structurelle globale du matériau.

IV. 4 Conclusion

Les simulations numériques effectuées par CAST3M et ABAQUS ont permis de prendre en compte deux modèles complémentaires de modélisation du béton composite à base de déchets recyclés à différentes échelles de modélisation macroscopique et mésoscopique.

La modélisation macroscopique par CAS3M a permis d'analyser le comportement global du béton et de mettre en évidence l'influence des granulats recyclés sur la ductilité et la rigidité.

La modélisation multi-échelles par Abaqus a permis une analyse plus réaliste de l'évolution des fissures, de la redistribution des contraintes et de la contribution des fibres. Particulièrement, la distribution des agrégats et leur teneur par rapport aux fibres de renforcement.

La confrontation des résultats numériques avec les résultats des essais a permis de valider :

La complémentarité des deux approches : Cast3M pour la compréhension globale et Abaqus pour l'analyse à l'échelle des granulats.

La cohérence générale des tendances observées, même si certains écarts persistent,

L'importance de prendre en compte la distribution réelle des agrégats, l'ITZ et les défauts liés aux granulats recyclés afin d'améliorer la précision et la fiabilité des modèles numériques.

Ces observations constituent une base solide pour la discussion des résultats obtenus numériquement, et la mise en perspective de ces résultats pour fonder les recommandations associées à l'optimisation de la modélisation et de la formulation des bétons composites à granulats recyclés avec et sans renforts.

CONCLUSION GÉNÉRALE

*« Ce que nous savons est une goutte d'eau ;
ce que nous ignorons est un océan. »*
Isaac Newton

Le secteur de la construction rencontre plusieurs défis, parmi lesquels l'utilisation croissante des agrégats naturels dans la composition du béton ; ce dernier est un matériau clé pour les structures de génie civil. Afin de contourner ces problèmes, plusieurs chercheurs ont incorporé les agrégats de déchets recyclés dans la composition de béton (plastiques, pneumatiques, verres, lin, bambou). Cette solution prometteuse a pour but de résoudre le problème d'insuffisance des agrégats naturels comme ceux liés à l'environnement et à la santé humaine. L'incorporation de ces déchets recyclés dans la matrice cimentaire nécessite une évaluation approfondie de leurs effets sur les propriétés mécaniques des bétons composites.

Dans le but de développer une méthodologie de modélisation numérique adéquate permettant de simuler et de prédire le comportement mécanique et à la rupture des bétons à base de déchets recyclés, avec et sans renforcement par fibres. Le calibrage et la validation des modèles numériques ont été élaborés et confrontés avec les résultats des études.

Synthèse des apports de la recherche

I. Synthèse bibliographique et contexte environnemental

- Les premiers chapitres de cette étude se focalisent sur une étude bibliographique élargie qui permet de distinguer le rôle des différents types de déchets recyclés utilisés comme substituant dans la formulation des bétons composites ainsi que leurs effets sur les propriétés mécaniques et à la rupture.
- Il a été constaté que certains types de déchets tels que le plastique et le caoutchouc diminuent les propriétés mécaniques du béton ; par conséquent, d'autres déchets comme le verre, le basalte et les déchets issus d'agro-alimentation améliorent les propriétés de ces composites cimentaires.

- Les limitations liées aux granulats recyclés en termes de porosité et d'adhérence, n'empêchent pas l'utilisation de ces substitutions autant qu'agrégats valorisés dans les bétons pour optimiser l'exploitation des granulats naturels.

II. Modélisation numérique multi-échelles de l'endommagement du béton

- Dans cette partie, les phénomènes d'endommagement des bétons ont été présentés ainsi que les aspects fondamentaux de compréhension du comportement à la rupture des structures. La présentation des approches numériques adoptées dans ce travail de thèse ainsi que les outils numériques utilisés (Cast3M et ABAQUS) et les modèles d'étude du béton, que ce soit à l'échelle macroscopique ou mésoscopique, par la modélisation mésoscopique par la méthode PI (π) de distribution non aléatoire des agrégats.

III. Validation numérique des modèles EF multi-échelles

- La modélisation macroscopique sous Cast3M des poutres entaillées en bétons composites montre une dépendance remarquable à plusieurs paramètres : la morphologie, les dimensions et les taux de substitution, qu'ils soient intégrés à la formulation du béton en remplacement d'agrégats naturels ou sous forme de fibres de renforcement.
- La validation des modèles numériques par les essais expérimentaux et la bonne concordance entre les résultats, notamment pour les faibles taux de substitution en caoutchouc, permet de confirmer la fiabilité des modèles macroscopiques adaptés sous Cast3M.
- Concernant le cas de la modélisation macroscopique sous ABAQUS des poutres avec et sans entailles en béton géopolymères renforcé de fibres, les bons résultats de convergence entre les analyses numériques macroscopiques et les essais expérimentaux du béton géopolymère reflètent correctement le comportement global des éprouvettes, tandis que la modélisation mésoscopique des échantillons contenant des fibres d'acier aboutit à une surestimation des analyses numériques par rapport aux essais expérimentaux pour les taux élevés de fibres.

- L'analyse à l'échelle mésoscopique des poutres de béton géopolymères contenant des fibres de verre nous mène à conclure que la longueur et la combinaison des fibres ont un effet remarquable sur le comportement du béton renforcé. La propagation des fissures montre que les fibres courtes contrôlent l'amorçage des endommagements, tandis que les fibres longues assurent l'effet de pontage en post-fissuration.
- On confirme la validité du modèle macroscopique du béton géopolymère pour reproduire le comportement global, tandis que le modèle mésoscopique est assez limité pour les taux élevés de fibres, ce qui implique une nécessité d'affiner la prise en compte de certains paramètres associés à la distribution et à l'orientation de ces renforts.

IV. Analyse et étude paramétrique

- La méthode de distribution PI est adoptée pour répartir les agrégats recyclés avec le modèle développé sous ABAQUS, ce qui permet de mieux représenter l'effet des granulats sur la fissuration et le comportement mécanique et à la rupture. L'analyse mésoscopique montre que l'incorporation des granulats recyclés améliore la ductilité et la capacité d'absorption d'énergie, tandis qu'il réduit la rigidité. L'ajout de fibres d'acier améliore la rigidité et la dissipation d'énergie en assurant un rôle de pontage et en homogénéisant le champ de contraintes.

PERSPECTIVES

Comme perspective de ce travail, plusieurs études peuvent se poursuivre dans le but d'enrichir et d'élargir le contenu de la thématique abordé dans cette thèse :

- Développement des études paramétriques pour d'autres types de déchets, de fibres et notamment des formulations hybrides de même ou différentes morphologies de déchets recyclés.
- Généralisation du modèle EF (multi-échelles) proposé pour d'autres types de déchets (Agro-alimentaire, SMA...etc).
- Proposition de nouveaux types d'éléments finis, performants et robustes pour l'analyse numérique de différents types de déchets afin d'optimiser le coût de calcul.
- L'exploration de la modélisation de l'ITZ pour améliorer la convergence entre les simulations et les essais expérimentaux.
- L'incorporation de l'intelligence artificielle (IA) dans la prédiction du comportement mécanique et à la rupture des composites cimentaires.
- Prédiction du comportement dynamique et à la fatigue des éléments de structure de génie civil en béton composite à base d'agrégats recyclés.

Bibliographie

- Aissaoui, N. 2018. Apport de la modélisation mésoscopique dans la prédiction de la fissuration des structures en béton : Aspects énergétiques et effets d'échelle. Thèse de doctorat. Université Aboubakr Belkaïd. Tlemcen. Algérie.
- Akbarnezhad, A., Ong, K.C.G., Zhang, M.H., Tam, C.T., Foo, T.W.J. 2011. Microwave-assisted beneficiation of recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*. 25, 3469–3479
- Akcaozoglu, S., Atis, C. D., Akcaozoglu, K. 2010. An investigation on the use of shredded waste PET bottles as aggregate in lightweight concrete. *Waste Management*. 32, 285–290
- Alam, S. Y. 2011. Experimental study and numerical analysis of crack opening in concrete. Thèse de doctorat, École Centrale de Nantes.
- Althoey, F., Oluwaseun Awoyera, P., Inyama, K., Arsalan Khan, M., Mursaleen, M Hadidi, H. M., Najm, H. M. 2022. Strength and microscale properties of bamboo fiber-reinforced concrete modified with natural rubber latex. *Materials*.
- Aperçu de la loi sur le recyclage des matériaux de construction. Consulté le 22 juillet 2025, sur <https://www.env.go.jp/recycle/build/gaiyo.html>
- Arslan, M. E. 2016. Effects of basalt and glass chopped fibers addition on fracture energy and mechanical properties of ordinary concrete: CMOD measurement. *Construction and Building Materials*. 114, 383–391
- Azad, A. M. 2017a. Modelling the mechanical properties of concrete containing PET waste aggregate. *Construction and Building Materials*. 150, 595–605.
- Azad A. M. 2017b. Flexural behavior and analysis of reinforced concrete beams made of recycled PET waste concrete. *Construction and Building Materials*. 155, 593–604.
- Badger, L. 1994. Lazzarini's lucky approximation of Pi. *Mathematics Magazine* 67, 83-91.
- Barenblatt, 1962. The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture. *Advan. Appl. Mech*, (7), 55–129.
- Batayneh, M., Marie, I., Ibrahim, A. 2007. Use of selected waste materials in concrete mixes. *Waste Management*. 27, 1870–1876

- Bazant, Z. P. 1976. Instability, ductility and size effect in strain-softening concrete. *Journal of Engineering Mechanics Division*. American Society of Civil Engineers. 102, 331–344.
- Bažant, Z.P., Oh, B.H. 1983. Crack band theory for fracture of concrete. *Materials and Structures*, 16, 155–177.
- Bazant, Z. P. 1984. Size effect in blunt fracture: Concrete, rock, metal. *Journal of Engineering Mechanics (ASCE)*. 110 (4), 518–535.
- Bazant, Z. P. & Planas, J. 1998. *Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials*. CRC Press. Boca Raton and London.
- Bažant, Z.P., Jirásek, M. 2002. Nonlocal Integral Formulations of Plasticity and Damage: Survey of Progress. *Journal of Engineering Mechanics*. 128 (11), 1119–1149.
- Bažant, Z. P. 2005. *Scaling of structural strength*, London: Hermes-Penton (Kogan Publishing).
- Beddar, M. (2005). Permeability and porosity characteristics of steel fiber reinforced concrete, *Asian J. Civ. Eng*, 6 (4) 317-330.
- Beijing Municipal People's Government – Foreign Affairs Office. (2020, 30 juillet). Beijing Municipal Regulations on the Management of Municipal Solid Waste. Consulté le 22 juillet 2025, sur https://wb.beijing.gov.cn/en/policy_release/others_1/202007/t20200730_1966454.html
- Benkemoun, N., Poullain, Ph., Al Khazraji, H., Choinska, M., Khelidj, A. 2016. Meso-scale investigation of failure in the tensile splitting test: Size effect and fracture energy analysis. *Engineering Fracture Mechanics*, 168, 242–259.
- Bhee, N., Tafsirojjaman, T., Liu, Y., Awoyera, P., Kumar, A., Keerio, M. A. 2021. Experimental Study on Engineering Properties of Cement Concrete Reinforced with Nylon and Jute Fibers. *Buildings*. 11, 454.
- Bideci, A., Öztürk, H., Bideci, Ö. S., Emiroglu, M. 2017. Fracture Energy and Mechanical Characteristics of Self-Compacting Concretes Including Waste Bladder Tyre. *Construction and Building Materials*. 149, 669–678.
- Binici, H. 2007. Effect of crushed ceramic and basaltic pumice as fine aggregates on concrete mortars properties. *Construction and Building Materials* 21. 1191–1197
- Bishetti, P., Ameersohel, Basavannevva, N., Suhas, M., Veergangadhar, A. 2019. Glass Fiber Reinforced Concrete. *SSRG International Journal of Civil Engineering*. 6.

- Buffon, G.-L. Leclerc, Comte de. 1777. Essai d'Arithmétique morale. Supplément à l'Histoire naturelle. Tome IV. Paris. Imprimerie Royale.
- Buyle-Bodin, F., Zaharieva, R. H. 2002. Influence of industrially produced recycled aggregates on flow properties of concrete. *Materials and Structures*, 35, 504–509
- California Building Standards Commission. 2019. 2019 California Green Building Standards Code (CALGreen), Title 24, Part 11.
- Carpinteri, A. 1989. Decrease of apparent tensile and bending strength with specimen size: two different explanations based on fracture mechanics. *Int J Solids Struct.* 25, 407–29.
- Carpinteri, A. 1994. Fractal nature of material microstructure and size effects on apparent mechanical properties. *Mechanics of Materials*, 18 (2), 89 – 101.
- CASANOVA, P. (1995). Bétons renforcés de fibres métalliques : du matériau à la structure. Etude expérimentale et analyse du comportement de poutres soumises à la flexion et à l'effort tranchant, Ph.D Thesis, l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, France.
- Chaitanya kumar, J.D., Abhilash, G.V.S., Khasim Khan, P., Manikanta sai, G., Tarakaram, V. 2016. Experimental Studies on Glass Fiber Concrete. *American Journal of Engineering Research (AJER)*. 5, 100-104
- Chandramouli, K., Srinivasa Rao, P., Pannirselvam N, Seshadri Sekhar, T., Sravana, P. 2010. STRENGTH PROPERTIES OF GLASS FIBRE CONCRETE. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 5
- Chiadighikaobi, P. C. 2019. Effects of basalt fiber in lightweight expanded clay concrete on compressive strength and flexural strength of lightweight basalt fiber reinforced concrete. *Materials Science and Engineering*. 640, 012055.
- Cuvilliez, S. 2012. Passage d'un modèle d'endommagement continu régularisé à un modèle de fissuration cohésive dans le cadre de la rupture quasi-fragile. Thèse de doctorat. L'École nationale supérieure des mines de Paris. France.
- Debeib, F., Kenai, S. 2008. The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete. *Construction and Building Materials*. 22, 886–893
- De Brito, J., Pereira, A.S., Correia, J. R. 2005. Mechanical behaviour of non-structural concrete made with recycled ceramic aggregates. *Cement & Concrete Composites*. 27, 429–433

- De Brito, J. & Saikia, N. 2013. Recycled Aggregate in Concrete: Use of Industrial, Construction and Demolition Waste. Green Energy and Technology, Springer-Verlag, London.
- De Brito, J.R., Correia, J.S., Lima, J. 2014. Performance mécanique post-incendie du béton fabriqué avec des agrégats de déchets plastiques sélectionnés. Cement & Concrete Composites. 53, 187–199
- Diaconis, P. 1976. Buffon's Needle Problem with a Long Needle. J. Appl. Prob. 13, 614-618.
- Dilbas, H. (2021). An Investigation on Aggregate Distribution in Concrete. International Journal of Concrete Technology, 7(2), 1–7
- Dörrie, H. 1965. 100 Great Problems of Elementary Mathematics: Their History and Solutions-Buffon's Needle Problem. pp. 73-77. New York, Dover.
- Du, Q., Cai, C., Lv, J., Wu, J., Pan, T., Zhou, J. 2020. Experimental Investigation on the Mechanical Properties and Microstructure of Basalt Fiber Reinforced Engineered Cementitious Composite. Materials. 13. doi:10.3390/ma13173796
- Dugdale, D. S. 1960. Yielding of steel sheets containing slits. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 8(2), 100-104.
- El-Gelani, A. M., High, C.M., Rizkalla, S. H., Abdalla, E. A. 2018. Effects of Basalt Fibres on Mechanical Properties of Concrete. MATEC Web of Conferences 149, 01028.
- Zhou, H., Jia, B., Huang, H., Mou, Y. 2020. Experimental Study on Basic Mechanical Properties of Basalt Fiber Reinforced Concrete. Materials. 13, 1362. doi:10.3390/ma13061362
- Elemam, W., Agwa, I. S. , Tahwia, A. 2023. Reusing Ceramic Waste as a Fine Aggregate and Supplemental Cementitious Material in the Manufacture of Sustainable Concrete buildings. 13(11): 2726. DOI: 10.3390/buildings13112726
- Fernández, J. A., Le Moigne, N., El Hage, R., Le Duc, A., Bono, P., Bergeret, A. 2014. Selective removal of flax fibre extractives and its influence on the interfacial behaviour of flax fibre / epoxy composites. Conference: BiPoCo2014
- Ferreira, L., de Brito, J., Barra, M. 2011. Influence of pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on structural concretes mechanical and durability properties. Magazine of Concrete Research. 63, 617–627

- Ferreira, M.D.C., Venturini, W.S., Hild, F., 2011. On the analysis of notched concrete beams: From measurement with digital image correlation to identification with boundary element method of a cohesive model. *Engineering Fracture Mechanics*. 78, 71–84.
- Fraj, A.B, Kismi, M., Mounanga, P. 2010. Valorization of coarse rigid polyurethane foam waste in lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. 24, 1069-1077
- Frigione, M. 2010. Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete. *Waste management*. 30, 1101–1106
- Ganjian, E., Khorami, M., Maghsoudi, A.A. 2009. Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete. *Construction and Building Materials*. 29, 1828–1836
- Gesoglu, M., Guneyisi, E. 2011. Permeability properties of self-compacting rubberized concrete. *Construction and Building Materials*. 25, 3319–3326
- Gesoglu, M., Güneyisi, E., Hansu, O., Etli, S., Alhassan, M. 2017. Mechanical and fracture characteristics of self-compacting concretes containing different percentage of plastic waste powder. *Construction and Building Materials*. 140, 562–569.
- Gobi, K., Kaleeswaran, M., Amaresh, D., Dhanush, R. 2021. INVESTIGATION OF MECHANICAL BEHAVIOUR OF SISAL BAMBOO AND EPOXY REINFORCED NATURAL COMPOSITE. *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*. 2021 Vol. 5, Issue 12, ISSN No. 2455-2143, Pages 307-310. DOI: 10.33564/IJEAST.2021.v05i12.052
- Griffith, A.A. 1921. The Phenomena of Rupture and Flow in Solids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 221, 582–593.
- Guendouz, M., Hadjadj, M., Boukhalkhal, D., Benatallah, L., Bounaceur, K., Hamraoui, S., Meghraoui, F. 2025. Experimental investigation on mechanical and durability properties of sand concrete reinforced by vegetable fibers. *STUDIES IN ENGINEERING AND EXACT SCIENCES*. 6, 01-22. DOI: 10.54021/seesv6n1-019
- Guerra, I., Vivar, I., Llamas, B., Juan, A., Moran, J. 2009. Eco-efficient concretes: the effects of using recycled ceramic material from sanitary installations on the mechanical properties of concrete. *Waste Management*. 29, 643–646
- Haido, J. H., Majeed, S.S., Karpuzcu, M. 2020. Flowability, strength and permeability characteristics of selfcompacted concrete made with basalt fiber. *Academic Journal of Nawroz University*. 9, 194.

- HALLONET, A. 2016. Développement et caractérisation d'un matériau composite à base de fibres de lin - Application au renforcement de structures en béton par collage externe. Ph.D. Thesis. France.
- Hameed, R., Maryam, I., Shahzad, S., Hassan, M.I., Khadija, Arshad, E. (2023). Mechanical performance of 100% recycled aggregate concrete (RAC) bricks, REV CONSTR Journal, 22(1), 203-222. <http://dx.doi.org/10.7764/rdlc.22.1.203>
- Hilal, N. N. 2016. Characteristics of Self-Compacting Concretes with Tire Rubber Wastes. Ph.D. Thesis. Turkey.
- Hillerborg, A., Modéer, M., Petersson, P.E. 1976. analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. cement and concrete research. 6 (6), 773–782.
- Hossain, M. B., Bhowmik, P., Shaad, K.M. 2016. Use of waste plastic aggregation in concrete as a constituent Material. Progressive Agriculture. 27, 383-391
- Iniya, M. P. & Nirmalkumar, K. 2021. A Review on Fiber Reinforced Concrete using sisal fiber. Conf. Series, Materials Science and Engineering 1055, 012027
- Irwin, G.R., 1957. Analysis of Stresses and Strains Near the End of a Crack Traversing a Plate. J. Applied Mechanics, 24, pp.361–364
- Ismail, Z.Z. & Al-Hashmi, E. A. 2008. Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement. Waste Management. 28, 2041–2047
- J. G. M. Van Mier. Fracture processes of concrete: assessment of material parameters for fracture models. CRC Press, Boca Raton, 1997
- Jiang, C., Fan, K., Wu, F., Chen, D. 2014. Experimental study on the mechanical properties and microstructure of chopped basalt fibre reinforced concrete. Materials and Design. 58, 187–193
- Jiao, H., Wu, Y., Chen, X., Yang, Y. 2019. Flexural Toughness of Basalt Fibre-Reinforced Shotcrete and Industrial-Scale Testing. Advances in Materials Science and Engineering. <https://doi.org/10.1155/2019/6568057>
- Kalaivani, M., Shyamala, G., Ramesh, S., Rajasri Reddy, I. 2020. Experimental Investigation on Jute Fibre Reinforced Concrete with Partial Replacement of Fine Aggregate by Plastic Waste. Materials Science and Engineering 981, 032066.
- Khaloo A. R., Dehestani, M., Rahmatabadi, P. 2008, Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire-rubber particles. Waste Management. 28, 2472–2482

- Kou, S.C., Lee, G., Poon, C.S., Lai, W.L. 2009. Properties of lightweight aggregate concrete prepared with PVC granules derived from scraped PVC pipes. *Waste Management*. 29, 621–628
- Krishna Mohan, S., Thayammal Ganesan, A., Ramarao, M., Amol Mangrulkar, L., Rajesh, S., Al Obaid, S., Alfarraj, S., Sivakumar, S., Ganesan, M. 2021. Evaluation of Mechanical Properties of Sisal and Bamboo Fibres Reinforced with Polymer Matrix Composites Prepared by Compression Moulding Process. *Advances in Materials Science and Engineering*. 1-8.
- Kumarasamy, K., GShyamala, Gebreyowhanse, H., Kumarasam, 2020. Strength Properties of Bamboo Fiber Reinforced Concrete. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 981.
- Kwan, W. H., Ramli, M., Kam, K. J., Sulieman, M.Z. 2012. Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties. *Construction and Building Materials*. 26, 565–573
- Leicester, R. H. 1969. The size effect of notches. In: *Proceedings of the second Australasian conference on mechanics of materials and structures*. Melbourne. 1–20.
- Li, J., Xiao, H., Zhou, Y. 2009. Influence of coating recycled aggregate surface with pozzolanic powder on properties of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. 23, 1287–1291
- Loi sur l'économie circulaire et la gestion durable des déchets. Consulté le 22 juillet 2025, sur <https://www.gesetze-im-internet.de/krwg/>
- Lopez, V., Llamas, B., Juan, A., Moran, J.M., Guerra, I. 2007. Eco-efficient concretes: impact of the use of white ceramic powder on the mechanical properties of concrete. *Biosystems Engineering*. 96, 559–564
- Loukil, M., Ben Hassine, W., Limam, O., Kotronis, P. 2019. Experimental determination of GFRC tensile parameters from three-point bending tests using an analytical damage model. *Construction and Building Materials*. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.005
- Małek, M., Łasica, W., Jackowski, M., Kadela, M. 2020. Effect of Waste Glass Addition as a Replacement for Fine Aggregate on Properties of Mortar. *Materials*. 13, 3189
- Mandelbrot, B.B. 1982. *The fractal geometry of nature*. New York: WH Freeman.
- Mantel, L. 1953. An Extension of the Buffon Needle Problem. *Ann. Math. Stat.* 24, 674-677.

- Martínez-López, M., Martínez-Barrera, G., Coz-Díaz, J. J. d., Martínez-Martínez, J. E., Gencel, O., Ribeiro, M.C.S., Varela-Guerrero, V. 2018. Polymer waste materials as fillers in polymer mortars: experimental and finite elements simulation. *Case Studies in Construction Materials*. 9, e00178
- Matallah, M., La Borderie, C., & Maurel, O. 2010. A practical method to estimate crack openings in concrete structures. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 34(13), 1615–1633.
- Mavroulidou M., Figueiredo, J. 2010. Discarded tyre rubber as concrete aggregate: a possible outlet for used tyres. *Global Nest Journal*. 12, 359–367
- Minhaj S., Kazmi, S., Munir, M. J., Wu, Y., Patnaikuni, I. 2018. Effect of macro-synthetic fibers on the fracture energy and mechanical behavior of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. 189, 857–868.
- Mosisa, S. & Sirhabizu, B. 2019. Study and Characterization of Flexural and Tensile Properties of Hybrid Bamboo/Sisal Fiber Reinforced Epoxy Composite. *Journal of Material Sciences & Engineering*. 2169-0022.
- Mohajershoejani, K. & Dadashian, F. 2014. RECYCLING OF JUTE WASTES USING PULPZYME ENZYME RECIKLIRANJE ODPADKOV JUTE Z UPORABO ENCIMA PULPZIMA. *Materials and technology*. 48, 757–760
- Naik, B. G., Nakkeeran, G., Roy, D., Uday Kiran, G., Gurram, K., Ramanjaneyulu, G. V., Alaneme, G. U., Bakare, M. S. 2025. Mechanical properties and machine learning analysis of concrete incorporating waste glass as coarse aggregate. *Discover Sustainability*. 6.
- Nambiar, R.A., Haridharan, M.K. 2021. Mechanical and durability study of high performance concrete with addition of natural fiber (jute). *Materials Today: Proceedings* 46, 4941–4947
- Olofinnade, O. & Adeyinka, O. 2024. The utilization of pulverized waste tire rubber in a soil–cement composite for sustainable compressed earth brick production. *Discover Civil Engineering*. DOI: 10.1007/s44290-024-00075-x
- Otsuka, K., Date, H. 2000. Fracture process zone in concrete tension specimen. *Engineering Fracture Mechanics*, 65, 111–131.
- Pacheco-Torgal, F., Jalali, S. 2010. Reusing ceramic wastes in concrete. *Construction and Building Materials*. 24, 832–838

- Padmini A.K., Ramamurthy, K., Mathews, M. S. 2009, Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. 23, 829–836
- Page, J., Khadraoui, F., Boutouil, M., Gomina, M. 2017. Multi-physical properties of a structural concrete incorporating short flax fibers. *Construction and Building Materials*.
- Patel, K., Gupta, R., Garg, M., Wang, B., Dave, U. 2019. Development of FRC Materials with Recycled Glass Fibers Recovered from Industrial GFRP-Acrylic Waste. *Advances in Materials Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1155/2019/4149708>.
- Prem Kumar, R., Chandan, G. K., Ramamoorthi, R. 2016. Fabrication and Testing of Natural Fiber Hybrid Composites. *International Journal of Engineering Research*. 5, 285-288
- Parmar, C., Salla, S. R. , Pitroda, Dr. J. R. 2021. INVESTIGATION ON COMPOSITE FIBER CONCRETE. *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science*. 2582-5208.
- Remadnia, A., Dheilly, R. M., Laidoudi, B., Quéneudec, M. 2009. Use of animal proteins as foaming agent in cementitious concrete composites manufactured with recycled PET aggregates. *Construction and Building Materials*. 23,3118–3123
- Saadati, Y., Chatelain, J. F., Lebrun, G., Beauchamp, Y., Bocher, P. Vanderessen, N. 2020. A Study of the Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Flax/Epoxy. *Journal of Composites Science*. 4, 66. doi:10.3390/jcs4020066
- Sadrmomtazi, A., Kazemi Rad, S. 2024. Investigating the fracture parameters of lightweight geopolymer concrete reinforced with steel and polypropylene fibers. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 129, 104223
- Saikia, N. & Brito, J. 2010. Mechanical performance of structural concrete containing recycled polyethylene terephthalate (PET) as a partial substitution of natural aggregate. Technical Report, Department of Civil Engineering and Architecture, ICIST, Instituto Superior Técnico (IST), Technical University of Lisbon, 0871-7869
- Saikia, N., de Brito, J. 2014. Mechanical properties and abrasion behaviour of concrete containing shredded PET bottle waste as a partial substitution of natural aggregate. *Construction and Building Materials*. 52, 236–244
- Saliba, J., Matallah, M., Loukili, A., Regoin, J. P., Grégoir, D., Verdon, L., Pijaudier-Cabot, G. 2016. Experimental and numerical analysis of crack evolution in concrete

through acoustic emission technique and mesoscale modelling. *engineering Fracture Mechanics*. 167, 123–137.

- Schuster, E. F. 1974. Buffon's Needle Experiment. *Amer. Math. Monthly* 81, 26-29.
- Seidl, S., Vizlay, V., Domski, J., Katzer, J. 2017. Fracture Mechanical Properties of Cement-Based Composites with Various Amount of Waste Aggregates. *Procedia Engineering*. 190, 345 – 351.
- Senthamarai R. M. & P.Devadas Manoharan. 2005. Concrete with ceramic waste aggregate. *Cement & Concrete Composites*. 27, 910–913
- Shaikh, F. U. A., Nguyen, H. L. 2013. Properties of concrete containing recycled construction and demolition wastes as coarse aggregates, *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*.
- Shah, D.U., Schubel, P., Clifford, M. 2013. Can flax replace E-glass in structural composites? A small wind turbine blade case study. *Composites Part B Engineering*. 52, 172-181.
- Siva, R., Valarmathi, T. N., Siddardha, B., Sanjana, K., Dakshin, B. 2019. Processing and Evaluation of Mechanical Properties of Sisal and Bamboo Chemically Treated Hybrid Composite. *innovative Design, Analysis and Development Practices in Aerospace and Automotive Engineering, Lecture Notes in Mechanical Engineering*.
- Solomon, H. 1978. *Geometric Probability - Buffon Needle Problem, Extensions, and Estimation of Pi*, pp. 1-24, SIAM, Philadelphia.
- Sukontasukkul, P. & Chaikaew, C. 2006. Properties of concrete pedestrian block mixed with crumb rubber. *Construction and Building Materials*. 20, 450–457
- Suzuki, M., Meddah, M.S., Sato, R. 2009. Use of porous ceramic waste aggregates for internal curing of high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*. 39, 373–381
- Topçu, I.B. & Canbaz, M. 2007. Utilization of crushed tile as aggregate in concrete. *Iranian Journal of Science & Technology*. 31, 561–565.
- Torkittikul, P. & Chaipanich, A. 2010. Utilization of ceramic waste as fine aggregate within Portland cement and fly ash concretes. *Cement & Concrete Composites*. 32, 440–449
- Uygunoglu, T., Topcu, I. B. 2010. The role of scrap rubber particles on the drying shrinkage and mechanical properties of self-consolidating mortars. *Construction and Building Materials*. 24, 1141–1150

- Van Mier, J.G.M., 2012. Concrete fracture : a multiscale approach, CRC Press.
- Venkateshwaran, S., Kalaiyarrasi, A. R. R. 2018. Sisal Fiber Reinforced Concrete. Journal of Emerging Technologies and Innovative Research.
- Weibull. W. 1939. Phenomenon of rupture in solids. In Proceedings, Royal Swedish Institute of Engineering Research. 153, 1–55, Stockholm.
- Wu, Z., Hua, R., JianJun, Z., Feng, X., Wei, D. 2011. An experimental investigation on the FPZ properties in concrete using digital image correlation technique. Engineering Fracture Mechanics, 78 (17), 2978–2990.
- Yakhlaf, M., Abdul Aziz, A., Soudki, K.A., El-Gabry, A. 2015. FRESH AND MECHANICAL PROPERTIES OF BASALT FIBER REINFORCED CONCRETE. International Civil Engineering & Architecture Symposium for Academicians. DOI: 10.13140/RG.2.1.3585.2888.
- Zuaiter, M., El-Hassan, H., El-Maaddawy, T., El-Ariss, B. 2023. Flexural and shear performance of geopolymer concrete reinforced with hybrid glass fibers. Journal of Building Engineering. 72,106580.