

لديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Mémoire de Master

Présenté à l'Université 8 Mai 1945 de Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie Civil

Option : STRUCTURES

Présenté par : Mme Dorsaf HERGA

Thème

L'usage des matériaux recyclés dans la construction durable : revue systématique des applications et des performances

Sous la direction de : Dr. Messaouda BOUMAAZA

Juin 2025

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

قبل كل شيء، أتوجّه بخالص الشكر والحمد لله تعالى، الذي منحني القوة، والصبر، والثبات اللازم لإتمام هذا العمل. لقد كان هذا المسار مليئاً بالتحديات واللحظات الصعبة، لكنني استمددت من إيماني العزيمة على الاستمرار، وتجاوز العقبات، والبقاء وفية لأهدافي. إن هذا البحث لا يمثل مجرد إنجاز أكاديمي، بل هو ثمرة مسيرة شخصية طويلة، قادها التوفيق الإلهي، ودعمها القناعة بأن كل جهد مخلص لا بد أن يثمر في النهاية.

فالحمد لله الذي أعانني على اجتياز هذه المرحلة الهامة من حياتي بكرامة وصبر.

مُسَوِّدُ الشَّيْءِ

REMERCIEMENTS

Il m'est particulièrement cher de débiter cette section de remerciements en adressant toute ma reconnaissance à mon encadreur, Docteur **BOUMAAZA Messaouda**, pour l'accompagnement exceptionnel dont j'ai bénéficié tout au long de la réalisation de ce mémoire de fin d'études.

Dès le début de ce projet, Docteur **BOUMAAZA** a su me guider avec rigueur, bienveillance et professionnalisme. Ses conseils éclairés, sa capacité à poser les bonnes questions, et sa vision claire du travail de recherche ont été essentiels dans la construction de ma réflexion et dans l'orientation méthodologique de ce mémoire. Grâce à son expertise et à sa disponibilité constante, j'ai pu surmonter les difficultés rencontrées, approfondir mes analyses, et développer un travail à la fois personnel et rigoureux.

Je suis particulièrement reconnaissante pour la patience dont elle a fait preuve, et pour la qualité des échanges que nous avons eus. Docteur **BOUMAAZA** a toujours su créer un climat de confiance propice à l'apprentissage et à l'expression de mes idées, tout en m'encourageant à viser l'excellence. Elle n'a pas seulement été un guide académique, mais aussi un véritable mentor, dont l'engagement à mes côtés a été une source de motivation constante.

Ce mémoire n'aurait pas pu voir le jour sans son soutien indéfectible, et je mesure pleinement la chance que j'ai eue de pouvoir bénéficier de son encadrement.

Je lui adresse donc mes plus sincères et profonds remerciements, avec toute ma gratitude et mon respect.

Je tiens également à remercier tous les enseignants du département de génie civil. Je remercie chaleureusement les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail en acceptant de l'évaluer.

Dorsaf HERGA

DEDICACES

À ma très chère mère,

À toi, lumière de ma vie, femme au cœur grand comme le monde,
À toi, qui as toujours été là, discrètement mais fermement présente à mes côtés,
À toi, qui as su, dans le silence et la dignité, porter le poids des responsabilités,
À toi, qui t'es souvent oubliée toi-même pour que nous ne manquions de rien,
À toi, qui n'as jamais cessé de croire en moi, même lorsque moi-même je doutais.
Ta force tranquille, ton amour inépuisable, ta foi constante et ton sacrifice sans limites sont les piliers sur lesquels j'ai bâti chaque étape de mon chemin.
Tu m'as appris la valeur de l'effort, la patience dans l'épreuve, la sagesse dans le choix, et surtout, tu m'as appris à aimer, à donner, sans jamais attendre en retour.
Cette réussite, aussi modeste soit-elle, je te la dédie de tout mon cœur. Elle est le fruit de tes veilles silencieuses, de tes prières dans l'ombre, de tes larmes versées loin de nos regards, et de ton espoir que je devienne quelqu'un de bien. Qu'Allah te récompense pour tout ce que tu as donné, qu'Il t'accorde la santé, la paix intérieure, et une place au Paradis, car aucune parole, aucun geste, ne pourra jamais suffire à te remercier comme tu le mérites. Avec tout mon amour, mon respect et mon éternelle gratitude.

À la mémoire de mon père, le noble, Abdelkader HERGA.

À toi, héros de la patrie, ancien combattant, nationaliste reconnu,
À toi, dont le nom est gravé dans les mémoires et dont le courage est raconté dans les livres.
À toi, qui as donné tout pour la liberté et la dignité de ton pays,
À toi, dont le sacrifice est un honneur pour ta famille, ton peuple, et ta nation.
Tu es parti alors que j'étais encore enfant, Mais ton histoire m'a accompagné chaque jour comme une flamme intérieure, ton courage m'a inspiré, ton engagement m'a guidé, et ta mémoire m'a appris à marcher droit, fier d'être ta

filles. Qu'Allah t'accorde Sa miséricorde infinie, qu'Il t'élève parmi les martyrs et les hommes justes, et t'accorde une demeure éternelle dans Son vaste Paradis.

Tu n'as pas vu l'adulte que je suis devenu, mais chaque pas que je fais porte ton héritage. Tu vis à travers mon respect, mes choix, et ma volonté d'être digne de ton nom. Avec amour, fierté, et une prière sincère qui ne cessera jamais.

À mon frère Abdelghani,

Que Dieu te protège chaque jour de ta vie. Tu es bien plus qu'un frère pour moi. Tu es mon bras droit, mon pilier, celui sur qui je peux toujours compter. On est liés comme des jumeaux, comme deux âmes qui avancent ensemble malgré les épreuves, les joies, et le temps qui passe. Ta force, ta loyauté et ton cœur me donnent de la force chaque jour. Je suis fier de toi, reconnaissante de t'avoir à mes côtés, et rien ni personne ne pourra briser ce lien qui nous unit.

Fraternellement, avec tout mon amour et mon respect.

À mon mari bien-aimé,

Merci d'avoir été mon pilier tout au long de ce parcours. Par ta patience, ton amour et ton soutien silencieux, tu m'as donné la force d'avancer, même dans les moments les plus difficiles. Ta présence à mes côtés a fait toute la différence.

Que Dieu te bénisse et te récompense pour tout ce que tu fais, chaque jour, avec tant de générosité.

Avec tout mon amour.

Dorsaf HERGA

Table des matières

REMERCIEMENTS

DEDICACES

Liste des figures	IV
Liste des tableaux	VII
Résumé	VIII
Abstract	VIII
ملخص:.....	IX

Introduction générale

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

CHAPITRE I : Méthodologie de la revue systématique

Introduction :	4
I.1.Méthodologie de recherche :	4
I.2 Critères de sélection des études :	6
I.3 La diffusion des publications entre 2005 et 2025 :	7
I.4 Les pays les plus influents :	8
I.5 Principaux contributeurs :	9
I.5.1 Les auteurs les plus influents selon le nombre de citations :	9
I.5.2 Les sources les plus influentes en termes de citations.....	12
I.5.3 Les premiers pays en termes de citations :	14
I.5.4 Domaines et principaux thèmes abordés :	15
I.6 Discussions :	17
Conclusion :	21

CHAPITRE II : Les matériaux recyclésutilisés dans la construction

Introduction :	24
II.1 Définition des déchets de démolition :	24
II.1.1 Composition typique :	24
II.1.2 Enjeux de gestion :	26

II.1.3 L'importance de la valorisation des matériaux de construction :	26
II.1.4 Utilisation des déchets comme source de granulats recyclés	27
II.2 Les principaux matériaux recyclables dans le BTP :	28
II.2.1 Recyclage des bétons :	28
II.2.2 Recyclage des déchets en plastique :	31
II.2.3 Métaux recyclés :	34
II.2.4 Le verre recyclé :	36
II.2.5 Le bois recyclé :	37
II.2.6 Sous-produits industriels :	39
II.2.7 Les composites :	40
Conclusion :	41

CHAPITRE III : Valorisation des GBRs vers une construction durable

Introduction :	43
III.1 Évaluation des performances mécaniques des GBRs :	45
III.1.1 La distribution granulométrique (GBR) :	45
III.1.2 Propriétés mécaniques du béton avec des GBRs :	47
III.1.3 La capture du CO ₂ dans les granulats recyclés (GBRs) :	50
III.1.4 Analyse du cycle de vie (ACV) dans les GBRs :	50
Conclusion :	51
III.2 Effet des cendres volantes, de la fumée de silice et des fibres de polypropylène sur les propriétés du béton recyclé (GBRs):	51
III.2.1 Comportement des bétons à base de cendres volantes, fibre de polypropylène et granulats recyclés:	52
III.2.2 Propriétés mécaniques :	55
III.2.3 Propriétés physiques:	57
Conclusion :	58

CHAPITRE IV : Evaluation des performances des matériaux recyclés

Introduction :	60
IV.1 Analyse du cycle de vie appliquées aux matériaux recyclés :	61
IV.2 Comparaison environnementale et économique des agrégats naturels et recyclés à l'aide de l'ACV :	63
IV.2.1 Évaluation environnementale et économique :	63
IV.2.1.1 Evaluation de l'impact économique :	63
IV.2.1.2 L'évaluation de l'impact environnemental :	64
IV.3 Écologie et Durabilité Environnementale :	67
IV.4 Facteurs influençant la performance :	67
IV.5 :Application des matériaux recyclés dans la construction durable:	68
IV.5.1 Batiments résidentiels et commerciaux :	68
IV.5.2 Infrastructures routières :	71
IV.5.3 Ouvrages d'art :	72
IV.5.4 Applications dans les projets de rénovation :	73
IV.6 Avantages des évaluations des performances des matériaux recyclés :	75
Conclusion:	75
Conclusion Générale :	77
Recommandations futures :	78
Références bibliographiques :	80

Liste des figures

CHAPITRE I : Méthodologie de la revue systématique

Figure I. 1 : Methodologies de la revue systématique.....	5
Figure I. 2 : Documents par année de 2005 à 2025 d'après la base de données Scopus.	8
Figure I. 3 : Visualisation du réseau des auteurs les plus influents en fonction des citations. 11	
Figure I. 4 : Visualisation du réseau pour l'analyse de la cooccurrence des mots-clés.	16

CHAPITRE II : Les matériaux recyclés utilisés dans la construction

Figure II. 1 : Déchets inertes produits (en tonne).	24
Figure II. 2 : Déchets non dangereux (en tonne).....	25
Figure II. 3 : Déchets dangereux (en tonne).....	26
Figure II. 4 : Échantillons de déchets de démolition [1].....	27
Figure II. 5 : Principes de fonctionnement des différents concasseurs rencontrés sur les plateformes de recyclage : (a) concasseur à mâchoires (à gauche), (b) concasseur à percussion (au centre) et (c) concasseur à cône (à droite) [Lauritzen, et Jacobsen, 1991] [11,12].....	30

CHAPITRE III : Valorisation des GBRs vers une construction durable

Figure III.1 : Production mondiale de granulats vierges (millions de tonnes).	43
Figure III.2 : Tendance des publications de recherche sur les GBRs [10].....	45
Figure III.3 : les granulats grossiers de béton recyclé (GBRs). b) la distribution granulométrique.	45
Figure III. 4 : les granulats fins de béton recyclé (GBRs). b) la distribution granulométrique.	46
Figure III. 5 : Résistance à la compression normalisée du béton avec GBR par rapport aux remplacements [19–26].	47
Figure III. 6 : Variation de la résistance à la traction des bétons à 28J en fonction du taux de substitution [29]	48
Figure III. 7 : Influence du taux de substitution sur la résistance en Traction des bétons à base de granulats recyclés (béton de démolition) [29]	49
Figure III. 8 : Les granulats GN et GR.	53
Figure III. 9 : Analyse granulométrique des agrégats grossiers.	53
Figure III. 10 : Analyse granulométrique des agrégats fins.	54
Figure III. 11 : La résistance à la compression.	55
Figure III. 12 : Évaluation de la résistance à la traction.	56
Figure III. 13 : Microstructure du béton à base de fibres GB et CV.	56
Figure III. 14 : Résultats de densité de tous les mélanges.	57
Figure III. 15 : Résultats de l'absorption d'eau.	58

CHAPITRE IV : Evaluation des performances des matériaux recyclés

Figure IV. 1 : Coûts absolus et relatifs des différents types de granulats (coût de production des matières premières, par tonne) :	64
Figure IV. 2 : PRP (kg de CO) ₂ eq) par rapport au PE-NRe (MJ) résultats de l'examen de la littérature, par tonne de granulat.....	66
Figure IV. 3 : PRP (kg de CO) ₂ eq) par rapport à l'ADPF (MJ) résultats de l'EPD, par tonne de granulat.....	67
Figure IV. 4 : One World Trade Center, New York	69
Figure IV. 5 : EcoARK, Taipei une grande salle de spectacle.....	70
Figure IV. 6 : Construction d'une piste cyclable de 30 mètres à Giethoorn, aux Pays-Bas....	72

Liste des tableaux

CHAPITRE I : Méthodologie de la revue systématique

Tableau I. 1 : Documents par type selon la base de données Scopus.	7
Tableau I. 2 : Documents par pays de 2005 à 2025 selon la base de données Scopus.....	9
Tableau I. 3 : Les auteurs les plus influents en termes de citations.	10
Tableau I. 4 : Les sources les plus influentes en termes de citations.	13
Tableau I. 5 : Top des pays influents en termes de citations.	15

CHAPITRE II : Les matériaux recyclés utilisés dans la construction

Tableau II. 1 : Propriétés mécaniques.	29
Tableau II. 2 : Propriétés physiques.	29
Tableau II. 3 : Applications des granulats utilisés en construction en fonction des dimensions des granulats.	31
Tableau II. 4 : principaux plastiques recyclés issus de la démolition.	33
Tableau II. 5 : synthèse des principaux métaux recyclés issus de la démolition, leurs caractéristiques et les applications.	35
Tableau II. 6 : Propriétés mécaniques.	38
Tableau II. 7 : Propriétés physiques.	39

CHAPITRE III : Valorisation des GBRs vers une construction durable

Tableau III. 1 : Effet du remplacement du GBR sur le module d'élasticité du béton [31]. ...	49
Tableau III. 2 : Caractéristiques physiques des agrégats grossiers et des agrégats fins.	53
Tableau III. 3 : Caractéristiques physiques de la fibre de polypropylène.	54

CHAPITRE IV : Evaluation des performances des matériaux recyclés

Tableau IV. 1 : principales dimensions d'évaluation.	60
Tableau IV. 2 : Phases d'ACV pour les matériaux recyclés et dans l'architecture contemporaine et le génie civil.	62
Tableau IV. 3 : Type de granulats utilisés dans le béton et impacts environnementaux correspondants, d'après la littérature (GWP, en kg de CO ₂ Eq; PE-NRe, dans MJ).	65

Résumé

Le secteur du bâtiment et des travaux publics (BTP), essentiel au développement socio-économique, génère néanmoins des impacts environnementaux majeurs, notamment en consommation d'énergie, émissions de gaz à effet de serre et production de déchets. La valorisation des matériaux recyclés issus des déchets de construction et démolition (DCD) apparaît comme une solution durable pour réduire ces impacts. Ce mémoire présente une revue bibliométrique des recherches de 2005 à 2025, analysant les acteurs, tendances et collaborations scientifiques autour des matériaux recyclés dans la construction. Il synthétise les types de matériaux recyclés, leurs propriétés, avantages environnementaux et applications, avec un focus particulier sur les granulats de béton recyclé (GBR) et l'effet d'additifs comme les cendres volantes et fibres de polypropylène. Une analyse du cycle de vie (ACV) évalue les bénéfices environnementaux et économiques comparés aux matériaux naturels. Malgré des obstacles techniques, normatifs et économiques, les résultats confirment le potentiel des matériaux recyclés pour promouvoir une économie circulaire dans le BTP. Le mémoire propose des recommandations pour sensibiliser les professionnels et favoriser l'adoption de ces pratiques durables, contribuant ainsi à la transition écologique du secteur.

Mots clés : Matériaux recyclés, revue bibliométrique, déchets de construction et démolition, granulats de béton recyclé, analyse du cycle de vie.

Abstract

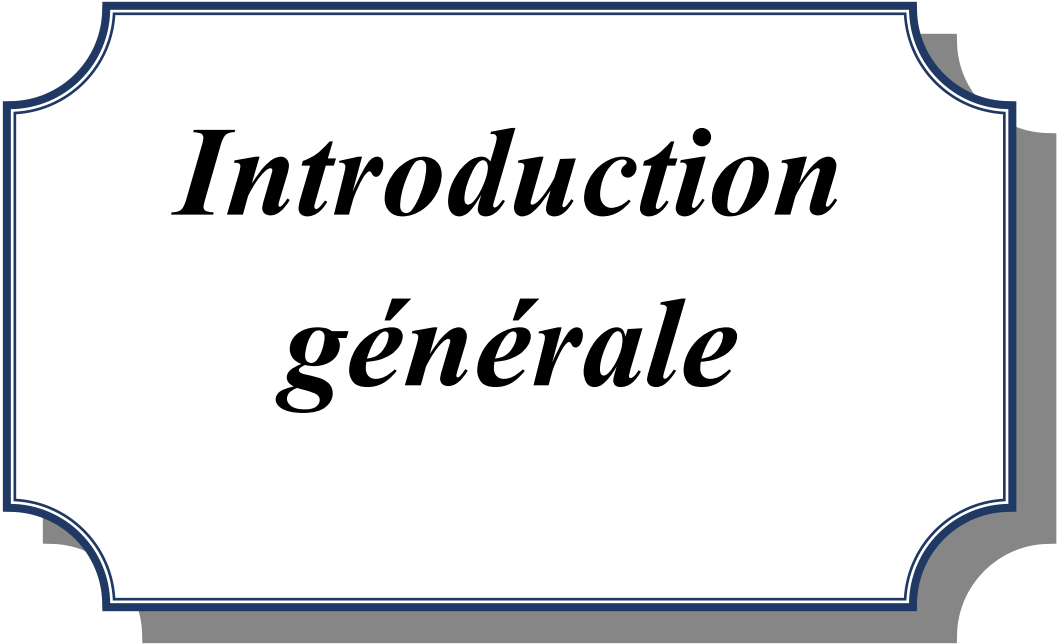
The building and public works (BTP) sector is essential to socio-economic development, but it also generates major environmental impacts, notably in terms of energy consumption, greenhouse gas emissions and waste production. The recovery of recycled materials from construction and demolition waste (CDW) appears to be a sustainable solution for reducing these impacts. This paper presents a bibliometric review of research from 2005 to 2025, analyzing the players, trends and scientific collaborations surrounding recycled materials in construction. It summarizes the types of recycled materials, their properties, environmental benefits and applications, with a particular focus on recycled concrete aggregates (RCA) and the effect of additives such as fly ash and polypropylene fibers. A Life Cycle Assessment (LCA) evaluates the environmental and economic benefits compared to natural materials. Despite technical, normative and economic obstacles, the results confirm the potential of recycled materials to promote a circular economy in the construction industry. The report puts forward recommendations to raise awareness among professionals and encourage the adoption of these sustainable practices, thereby contributing to the sector's ecological transition.

Keywords: Recycled materials, bibliometric review, construction and demolition waste, recycled concrete aggregates, life cycle assessment.

ملخص

يعد قطاع البناء والأشغال العامة (BTP) ضرورياً للتنمية الاجتماعية والاقتصادية، ولكنه مع ذلك يولد آثاراً بيئية كبيرة، لا سيما من حيث استهلاك الطاقة وانبعاثات غازات الاحتباس الحراري وإنتاج النفايات. ويبدو أن استرداد المواد المعاد تدويرها من مخلفات البناء والهدم (CDW) هو الحل المستدام للحد من هذه الآثار. يقدم هذا التقرير مراجعة ببيومترية للبحوث من عام 2005 إلى عام 2025، ويحلل الجهات الفاعلة والاتجاهات والتعاون العلمي المتعلق بالمواد المعاد تدويرها في مجال البناء. وهو يلخص أنواع المواد المعاد تدويرها وخصائصها وفوائدها البيئية وتطبيقاتها، مع التركيز بشكل خاص على الركام الخرساني المعاد تدويره (RCA) وتأثير المواد المضافة مثل الرماد المتطاير وألياف البولي بروبيلين. يقيم تقييم دورة الحياة (LCA) الفوائد البيئية والاقتصادية مقارنةً بالمواد الطبيعية. وعلى الرغم من العقبات التقنية والمعيارية والاقتصادية، فإن النتائج تؤكد قدرة المواد المعاد تدويرها على تعزيز الاقتصاد الدائري في صناعة البناء والتشييد. يقدم التقرير توصيات لزيادة الوعي بين المهنيين وتشجيع اعتماد هذه الممارسات المستدامة، وبالتالي المساهمة في التحول البيئي للقطاع.

الكلمات المفتاحية: المواد المعاد تدويرها، المراجعة البيومترية، نفايات البناء والهدم، الركام الخرساني المعاد تدويره، تحليل دورة الحياة.



Introduction générale

Introduction générale :

Le secteur du bâtiment et des travaux publics (BTP) joue un rôle central dans le développement socio-économique des sociétés modernes. Il est à l'origine de la création d'infrastructures essentielles – logements, routes, ponts, bâtiments publics – qui conditionnent la qualité de vie des populations. Cependant, cette contribution au progrès s'accompagne d'un impact environnemental considérable. À l'échelle mondiale, le BTP est responsable d'environ 40 % de la consommation d'énergie, 30 % des émissions de gaz à effet de serre, et 35 % des déchets solides produits chaque année. Ces chiffres alarmants placent le secteur parmi les plus polluants, soulignant l'urgence de repenser les modes de construction actuels à la lumière des principes du développement durable.

L'une des réponses les plus prometteuses à cette problématique réside dans la valorisation des déchets de construction et de démolition (DCD), qui représentent à eux seuls une part importante des déchets produits annuellement. Ces matériaux, longtemps considérés comme des rebuts, peuvent être transformés, traités et réutilisés comme matériaux recyclés dans divers domaines de la construction. Bétons concassés, briques recyclées, mélanges bitumineux retraités ou encore bois récupérés sont autant d'exemples de ressources secondaires pouvant substituer les matériaux traditionnels, avec des bénéfices environnementaux et économiques non négligeables.

L'utilisation de matériaux recyclés issus de la démolition s'inscrit ainsi dans une logique d'économie circulaire, qui vise à limiter l'extraction des ressources naturelles et à prolonger la durée de vie des matériaux par la réutilisation, le recyclage et la revalorisation. Cette démarche permet de réduire les volumes de déchets mis en décharge, de diminuer l'empreinte carbone des chantiers, et de réduire les coûts liés à l'approvisionnement et à la gestion des déchets. Cependant, malgré les avancées technologiques et la mise en place de cadres réglementaires incitatifs dans plusieurs pays, l'intégration des matériaux recyclés dans les projets de construction reste encore limitée.

Dans ce contexte, il devient essentiel de mener une revue systématique des connaissances disponibles sur le sujet afin de dresser un état des lieux rigoureux et exhaustif des applications concrètes des matériaux recyclés issus de la démolition, ainsi que de leurs performances dans un cadre de construction durable. Cette étude vise à :

- Identifier les types de matériaux recyclés les plus couramment utilisés,
- Analyser leurs performances techniques, environnementales et économiques,
- Recenser les applications dans différents types d'ouvrages,

- Évaluer les limites actuelles et les perspectives de développement.

Ainsi, cette revue permettra non seulement de mettre en lumière les potentiels réels de ces matériaux dans la transition écologique du BTP, mais aussi de proposer des recommandations en vue d'une meilleure intégration des pratiques de recyclage dans les projets futurs.

Le travail de recherche présenté dans cette étude s'articule autour de quatre chapitres principaux.

Le premier chapitre repose sur une revue systématique visant à analyser l'évolution des recherches liées à l'utilisation des matériaux recyclés dans le secteur de la construction. Cette analyse bibliométrique s'appuie sur les publications indexées dans la base de données **Scopus** entre 2005 et 2025. La visualisation des réseaux bibliométriques permet de mettre en évidence les relations entre les différentes composantes bibliographiques, identifiant ainsi les auteurs clés, les articles de référence et les collaborations scientifiques majeures. L'objectif principal est d'identifier les orientations de la recherche, les pays les plus actifs, les auteurs les plus influents, ainsi que les mots-clés et les revues les plus fréquemment associés à cette thématique. Cette méthodologie permet également d'examiner les collaborations internationales et les réseaux de co-citation entre chercheurs.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des différents types de matériaux recyclés utilisés dans la construction. Il aborde la définition des déchets de démolition, les principaux matériaux recyclables dans le BTP, leurs propriétés physico-mécaniques, leurs avantages environnementaux ainsi que leurs domaines d'application.

Le troisième chapitre s'intéresse à la valorisation des granulats de béton recyclé (GBRs) dans une optique de construction durable. Il analyse leur utilisation, évalue leurs performances mécaniques, et examine l'effet de l'incorporation de cendres volantes, de fumée de silice et de fibres de polypropylène sur les propriétés du béton recyclé.

Enfin, le quatrième chapitre traite de l'évaluation globale des performances des matériaux recyclés, notamment les impacts environnementaux et économiques des agrégats naturels et recyclés à l'aide de l'analyse du cycle de vie (ACV), et met en lumière les enjeux liés à l'écologie et à la durabilité environnementale suivi par une conclusion générale.

CHAPITRE I

Méthodologie de la revue systématique

Introduction :

L'usage des matériaux recyclés dans le secteur de la construction suscite un intérêt croissant face aux enjeux environnementaux, économiques et réglementaires liés à la gestion des ressources naturelles et des déchets de chantier. Parmi ces matériaux, les granulats recyclés issus du béton de démolition occupent une place centrale, offrant une alternative viable aux granulats naturels tout en participant à une économie circulaire. Bien que leur utilisation ne soit pas récente, l'évolution des normes, des techniques de traitement et des exigences de performance justifie une actualisation continue des connaissances dans ce domaine.

Afin d'apporter une vision claire et structurée de l'état de la recherche, ce chapitre présente la méthodologie de la revue systématique mise en œuvre pour analyser les travaux scientifiques consacrés à l'intégration des matériaux recyclés dans la construction. Cette démarche rigoureuse vise à identifier, sélectionner et évaluer de manière critique les études pertinentes selon des critères bien définis, en s'appuyant sur des bases de données reconnues. Elle permet de dégager les grandes tendances, les avancées techniques, ainsi que les lacunes ou points de controverse relatifs aux performances, à la durabilité et aux applications des matériaux recyclés, notamment les granulats de béton.

Ce travail s'inscrit dans une approche scientifique transparente et reproductible, essentielle pour orienter les futures recherches, informer les décideurs et soutenir la mise en œuvre de pratiques constructives plus durables.

I.1.Méthodologie de recherche :

Cette étude s'appuie sur une revue systématique visant à analyser l'évolution des travaux de recherche portant sur l'usage des matériaux recyclés dans le secteur de la construction, à travers une exploration bibliométrique des publications indexées dans la base de données Scopus entre 2005 et 2025. L'approche adoptée repose sur une combinaison d'analyse quantitative et de visualisation des données, afin d'offrir une vue d'ensemble des tendances scientifiques dans ce domaine.

L'objectif principal est d'identifier les orientations de la recherche, les pays les plus actifs, les auteurs les plus influents, ainsi que les mots-clés et les revues les plus fréquemment associés à cette thématique. Cette méthodologie permet également d'examiner les collaborations internationales et les réseaux de co-citation entre chercheurs.

Pour structurer l'analyse, un organigramme de la démarche méthodologique a été établi, tel qu'illustré dans la **Figure I.1**. Celui-ci décrit les différentes étapes suivies, depuis la définition de la question de recherche, la sélection des mots-clés, la collecte et le filtrage des publications, jusqu'à l'analyse bibliométrique proprement dite. Le logiciel VOSviewer, reconnu pour sa capacité à représenter visuellement les réseaux de co-auteurs, de co-occurrence de mots-clés, et de citations croisées, a été utilisé pour générer les cartes de visualisation bibliographique.

Cette approche permet non seulement de dresser un état des lieux des recherches actuelles sur les matériaux recyclés dans la construction, mais aussi d'identifier les lacunes, les opportunités de recherche futures, et les éventuelles synergies interdisciplinaires.

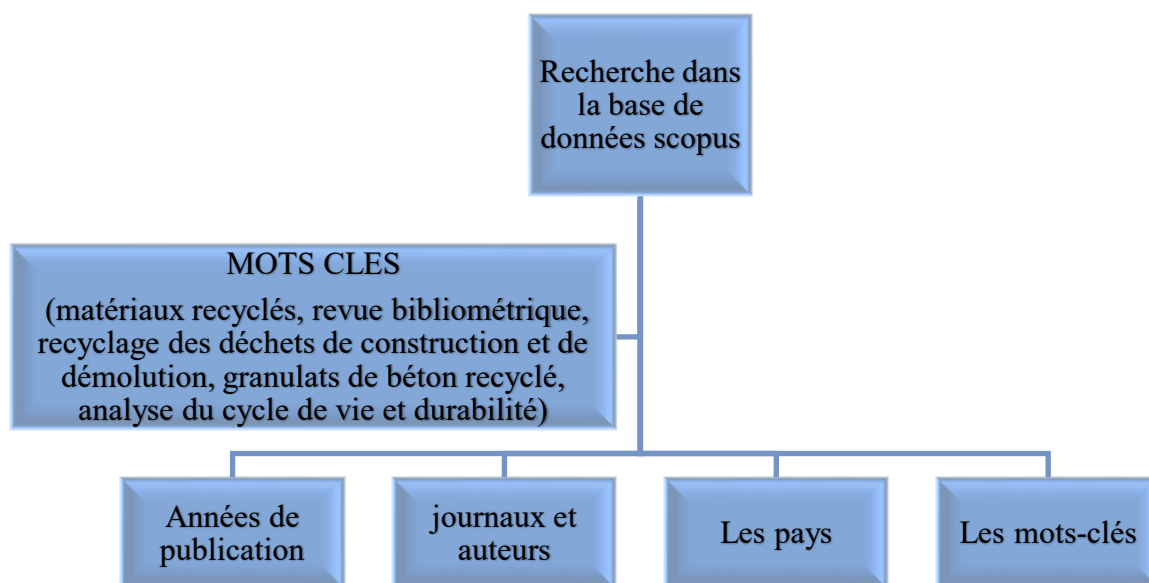


Figure I. 1 : Méthodologie de la revue systématique.

L'étude couvre la période allant de 2005 jusqu'au 2025 et s'articule autour des axes suivants :

- L'évolution temporelle du nombre de publications traitant de l'usage des matériaux recyclés dans la construction.
- L'identification des revues scientifiques et des auteurs les plus influents dans ce domaine.
- La répartition géographique des contributions, mettant en évidence les pays les plus actifs dans ce champ de recherche.

- L'analyse des mots-clés les plus fréquemment utilisés, afin de dégager les thématiques centrales et les tendances de recherche dominantes sur la période étudiée. ?

I.2 Critères de sélection des études :

Dans le cadre de cette revue systématique, les documents scientifiques ont été extraits exclusivement de la base de données Scopus, choisie pour sa large couverture multidisciplinaire et la richesse de ses métadonnées bibliométriques. Le choix de Scopus s'explique également par des contraintes d'accès à d'autres bases comme Web of Science (WOS), qui n'a pas été utilisée dans cette étude.

Les critères de sélection ont été définis comme suit :

- Période de publication : de 2005 à 2025.
- Langue : uniquement les publications en anglais, en raison de leur visibilité internationale et de leur compatibilité avec les outils bibliométriques.
- Type de documents : articles de revues, actes de conférences, chapitres de livres et revues systématiques, à l'exclusion des notes techniques, éditoriaux ou résumés seuls.
- Thématique : les études devaient porter explicitement sur l'usage de matériaux recyclés dans le secteur de la construction, avec des mots-clés comme recycled aggregate, construction materials, sustainability, waste recycling, etc.

L'ensemble des publications retenues a ensuite été traité à l'aide du logiciel VOSviewer pour permettre une analyse bibliométrique visuelle et approfondie.

Le **Tableau I.1** montre que les articles dominent le domaine avec 61 % du total des documents, ce qui indique qu'ils constituent le principal moyen de diffusion de la recherche. Les documents de conférence et les revues suivent avec respectivement 13,43 % et 12,71 %, ce qui reflète leur importance pour résumer les études existantes. Enfin, les chapitres de livres, les comptes rendus de conférences et les livres représentent une part moins importante, avec respectivement 7,44 %, 0,91 % et 0,36 %.

Tableau I. 1: Documents par type selon la base de données Scopus.

Type de document	Nombre de documents	Pourcentage %
Article	336	61
Conference Paper	74	13.43
Review	70	12.71
Book Chapter	41	7.44
Conference Review	5	0.91
Book	2	0.36

I.3 La diffusion des publications entre 2005 et 2025 :

La **Figure I.2** montre que la recherche dans le domaine des matériaux recyclés (MR), de la gestion de la construction et de la démolition (GCD) et de l'économie circulaire (EC) s'est considérablement développée au fil des ans, en particulier à partir de 2018. Auparavant, l'activité de publication était minime. Cependant, à partir de 2018, on a constaté une augmentation notable et, en 2019, le nombre de publications a commencé à augmenter régulièrement.

Cette croissance s'est encore accentuée au cours des années suivantes, reflétant probablement la sensibilisation mondiale croissante aux questions de durabilité, en particulier dans des domaines tels que l'économie circulaire et la gestion des déchets de construction et de démolition. Le nombre de publications a atteint un pic en 2024, ce qui suggère une forte orientation vers la recherche. Cette augmentation reflète probablement l'importance croissante accordée à la durabilité, aux pratiques d'économie circulaire et à la gestion des déchets de construction, ces sujets ayant gagné en pertinence au niveau mondial. Toutefois, la forte baisse observée en 2025 est très probablement due à des données incomplètes, les registres de publications étant encore en cours de mise à jour.

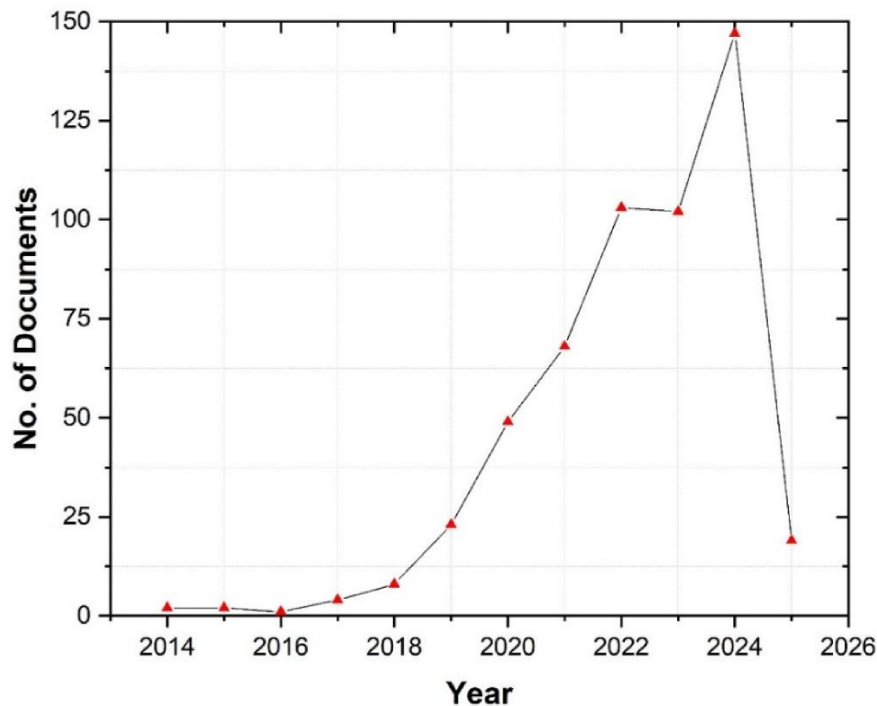


Figure I. 2: Documents par année de 2005 à 2025 d'après la base de données Scopus.

I.4 Les pays les plus influents :

Le **Tableau I.2** met en évidence les disparités mondiales dans les contributions à la recherche sur les MR, l'EC et la gestion des C&DW. L'Espagne (70), l'Italie (63) et le Portugal (47) sont en tête, probablement en raison de politiques fortes de réduction des déchets et de pratiques de construction axées sur l'EC. L'Australie (45), le Royaume-Uni (40), la Chine (38) et l'Inde (34) suivent, reflétant les efforts réglementaires croissants pour intégrer les principes de l'EC dans la gestion des C&DW. Le Brésil (26), l'Allemagne (26) et les contributeurs émergents comme la Suisse (16), la Turquie (16) et la France (15) font preuve d'un engagement limité, peut-être en raison de lacunes dans l'application des politiques, le financement ou la participation de l'industrie.

Cependant, malgré leur leadership technologique, les États-Unis (27) affichent une production de recherche comparativement plus faible, ce qui suggère un écart probable dans l'adoption rapide des stratégies d'EC dans la gestion des déchets de C&D. Les contributeurs émergents comme la Suisse (16), la Turquie (16) et la France (15) montrent un intérêt croissant mais restent sous-représentés, ce qui indique la nécessité d'incitations politiques plus fortes, de collaborations transfrontalières et d'investissements dans des initiatives de recherche. On peut en déduire que cette répartition inégale de la recherche suggère que certains pays sont pionniers

en la matière, mais qu'une coopération internationale plus large est nécessaire pour étendre les principes de l'économie circulaire à l'échelle mondiale et garantir des stratégies de gestion des déchets de C&D répandues et efficaces.

Tableau I. 2: Documents par pays de 2005 à 2025 selon la base de données Scopus.

Pays/Territoire	Documents par pays
Spain	70
Italy	63
Portugal	47
Australia	45
United Kingdom	40
China	38
India	34
United States	27
Brazil	26
Germany	26
Switzerland	16
Turkey	16
France	15
Hong Kong	15
Colombia	14

I.5 Principaux contributeurs :

I.5.1 Les auteurs les plus influents selon le nombre de citations :

Le **Tableau I.3** présente les 15 chercheurs les plus influents dans le domaine de la gestion des MR, de l'EC et de la C&DW, classés en fonction du nombre total de citations. Huang, Beijia se distingue comme l'auteur le plus cité, avec 1157 citations pour seulement six

documents. Cela signifie que, bien qu'il ait publié moins d'articles, le travail de Huang est largement référencé, ce qui a un impact significatif dans le domaine. Cela témoigne également d'une grande influence scientifique et d'une forte capacité de collaboration. Suivent de près Bleischwitz, Raimund ; Geng, Yong ; Kua, Harnwei ; Ren, Jingzheng ; et Wang, Xiangyu, tous avec 711 citations mais des publications moins nombreuses (un ou deux documents chacun).

Leur ratio élevé de citations par article suggère que leurs contributions sont largement référencées, mais leur portée collaborative (214 liens chacun) n'est pas aussi importante que celle de Huang.

Tableau I. 3: Les auteurs les plus influents en termes de citations.

N°:	Auteurs	Documents	Citations	Force totale des liens
1	Husang, Beijia	6	1157	234
2	Bleischwitz Raimund	2	787	214
3	Geng, Young	1	711	214
4	Kua, Harnwei	1	711	214
5	Ren, Jingzheng	1	711	214
6	Wang, Xiangyu	1	711	214
7	Zeschmar-Lahl, Barbara	1	580	0
8	Galvez-Martos, José-Luis	1	566	0
9	Schoenberger, Harald	1	566	0
10	Styles, David	1	566	0
11	Lu, Weisheng	5	529	82
12	Bao, Zhikang	2	459	71
13	Yuan, Hongping	2	459	113
14	Zhang, Chunbo	3	385	9
15	Hu, Mingming	3	385	9

En revanche, Zeschmar-Lahl, Barbara ; Galvez-Martos, José-Luis ; Schoenberger, Harald ; et Styles, David, malgré 566-580 citations chacun, n'affichent aucune force de lien, ce qui indique que leur travail est influent mais présente des lacunes en matière de coécriture étendue ou d'engagement interdisciplinaire. Lu, Weisheng (529 citations, 82 forces de lien) et

Bao, Zhikang (459 citations, 71 forces de lien) ont un profil plus équilibré, suggérant un niveau modéré de collaboration tout en maintenant l'impact des citations. Yuan, Hongping (459 citations, 113 liens) se distingue par un nombre de citations élevé et une forte présence sur le réseau, ce qui indique un engagement important dans les efforts de recherche collaborative. Enfin, Zhang, Chunbo et Hu, Mingming (385 citations chacun, 9 liens), bien que productifs, présentent une intégration plus faible dans des réseaux de recherche plus larges, ce qui souligne la possibilité d'accroître l'engagement interdisciplinaire.

Si l'on examine la visualisation du réseau de citations de la **Figure I.3**, certains chercheurs, comme Huang et Shooshtarian, sont clairement des figures centrales, fréquemment citées par de nombreux chercheurs. D'autres, comme De Brito, Jorge, semblent plus isolés, ce qui signifie que même si leur travail est influent, il est souvent cité dans des créneaux de recherche spécifiques plutôt que dans de multiples domaines interdisciplinaires. En résumé, ces 15 auteurs représentent les principales voix académiques qui animent la recherche sur l'économie circulaire dans le domaine de la gestion des déchets de construction. Certains sont largement cités en raison de leurs résultats novateurs, tandis que d'autres sont très collaboratifs, reliant diverses études et chercheurs.



Figure I. 3: Visualisation du réseau des auteurs les plus influents en fonction des citations.

I.5.2 Les sources les plus influentes en termes de citations :

Le **Tableau I.4** présente les sources académiques les plus influentes dans le domaine de la gestion des MR, de l'EC et des déchets de C&D, classées en fonction de l'impact des citations et de la connectivité.

Ressources, Conservation and Recycling (3163 citations) et Journal of Cleaner Production (2747 citations) apparaissent comme les sources les plus influentes dans la recherche sur l'EC et la gestion des déchets de construction et de démolition. Ces revues servent de plateformes clés pour faire progresser la gestion des déchets, l'efficacité des ressources et les pratiques de durabilité, soulignant leur large portée interdisciplinaire dans les domaines de la science, de la politique et de l'ingénierie de l'environnement. En outre, Sustainability (687 citations), Waste Management (558 citations) et le Journal of Environmental Management (558 citations) jouent un rôle crucial dans l'intégration des politiques environnementales, des méthodologies scientifiques et des solutions d'ingénierie, renforçant ainsi la nature interdisciplinaire de la recherche en EC.

Même avec la présence croissante de revues axées sur la durabilité, les publications spécifiques à la construction et à l'ingénierie semblent moins centrales dans le contexte plus large de l'EC. Par exemple, le Journal of Building Engineering (202 citations), Construction and Building Materials (168 citations) et le Journal of Industrial Ecology (146 citations) ont un impact de citation et une force de lien plus faibles, ce qui suggère un manque de collaboration interdisciplinaire entre la recherche sur le développement durable et les applications techniques de l'ingénierie. Bien que des revues comme Recycling (148 citations) et Sustainable Chemistry and Pharmacy (143 citations) contribuent à des domaines de spécialité, elles n'ont qu'une influence interdisciplinaire limitée, ce qui indique la nécessité d'une intégration plus forte entre la recherche technique spécialisée et les discussions plus larges de l'EC.

Tableau I. 4: Les sources les plus influentes en termes de citations.

N°:	Source	Documents	Citations	Force totale des liens
1	Resources, conservation and recycling	28	3163	117
2	Journal of Cleaner Production; Sustainability (Suisse)	32	2747	49
3	Materials	36	687	35
4	Waste Management	21	593	11
5	Journal of Environmental	13	558	63
6	Management	15	558	17
7	Science of the Total Environment	4	501	4
8	Waste Management and Research	16	303	38
9	Sustainable Production and Consumption	6	245	44
10	International Journal of Life Cycle Assessment	4	213	12
11	Journal of Building Materials	11	202	15
12	Construction And Building Materials	18	168	7
13	Recycling	7	148	14
14	Journal of Industrial Ecology	5	146	16
15	Sustainable Chemistry and Pharmacy	5	143	7

I.5.3 Les premiers pays en termes de citations :

L'analyse des contributions par pays dans les domaines de la gestion des MR, de l'EC et de la C&DW révèle des disparités significatives en termes d'impact académique et de collaboration, comme le montre le **Tableau I.5**. Le Royaume-Uni (3065 citations) et la Chine (2876 citations) se distinguent comme les plus influents, non seulement par le nombre total de citations, mais aussi par leurs solides réseaux de collaboration, la Chine affichant la force de lien totale la plus élevée (307). Cela indique que la recherche chinoise dans ce domaine est non seulement largement référencée, mais aussi bien intégrée dans les travaux universitaires internationaux. L'Espagne, bien qu'elle ait produit le plus grand nombre de documents (70), a un nombre de citations plus faible (2 237) et une force de lien plus limitée (100), ce qui indique une production de recherche élevée mais un engagement mondial ou une influence interdisciplinaire potentiellement moins importants.

Hong Kong (1543 citations) et l'Australie (1093 citations) affichent une forte présence, renforcée par une intégration élevée du réseau (202 et 183 force de lien, respectivement), ce qui les positionne comme des contributeurs clés dans le paysage évolutif de la recherche en EC et C&DW. Parallèlement, l'Italie (1203 citations, 169 liens) et le Portugal (1079 citations, 71 liens) conservent une influence constante, probablement en raison des politiques nationales mettant l'accent sur la durabilité et les pratiques de construction circulaire. En revanche, l'Allemagne (897 citations, 19 liens) et les États-Unis (615 citations, 85 liens), bien qu'étant des moteurs de la recherche dans d'autres domaines, affichent un degré de connectivité plus faible dans ce domaine, ce qui laisse entrevoir la possibilité d'une plus grande collaboration interdisciplinaire.

Tableau I. 5: Les pays influents en termes de citations.

N°:	Pays	Documents	Citations	Force totale des liens
1	United Kingdom	40	3065	242
2	China	39	2876	307
3	Spain	70	2237	100
4	Hong Kong	15	1543	202
5	Italy	62	1203	169
6	Australia	45	1093	183
7	Portugal	47	1079	71
8	Germany	26	897	19
9	Singapore	4	880	108
10	Irland	3	641	2
11	United States	27	615	85
12	Netherlands	13	598	9
13	Brazil	26	590	92
14	India	34	396	83
15	Austria	9	349	24

I.5.4 Domaines et principaux thèmes abordés :

Les Principaux mots-clés de recherche :

La **Figure I.4** donne un aperçu approfondi des interconnexions entre les thèmes de recherche dominants dans les domaines de la gestion des MR, de l'EC et des déchets de C&D. Le terme le plus en vue, « économie circulaire », apparaît comme le nœud le plus grand et le

plus central, ce qui renforce son rôle fondamental dans l'orientation des discussions sur la réduction des déchets, la durabilité et la réutilisation des matériaux. Les termes « déchets de construction et de démolition » et « recyclage » lui sont étroitement liés, ce qui indique qu'une grande partie de la recherche sur l'EC est fortement axée sur la réutilisation des matériaux, la minimisation des déchets de construction et l'optimisation des cycles de ressources. En outre, la « gestion des déchets » et « l'évaluation du cycle de vie » constituent des nœuds clés dans le réseau, démontrant la dépendance croissante à l'égard des mesures de durabilité et des outils d'évaluation des performances dans la détermination de l'impact environnemental des processus de construction.

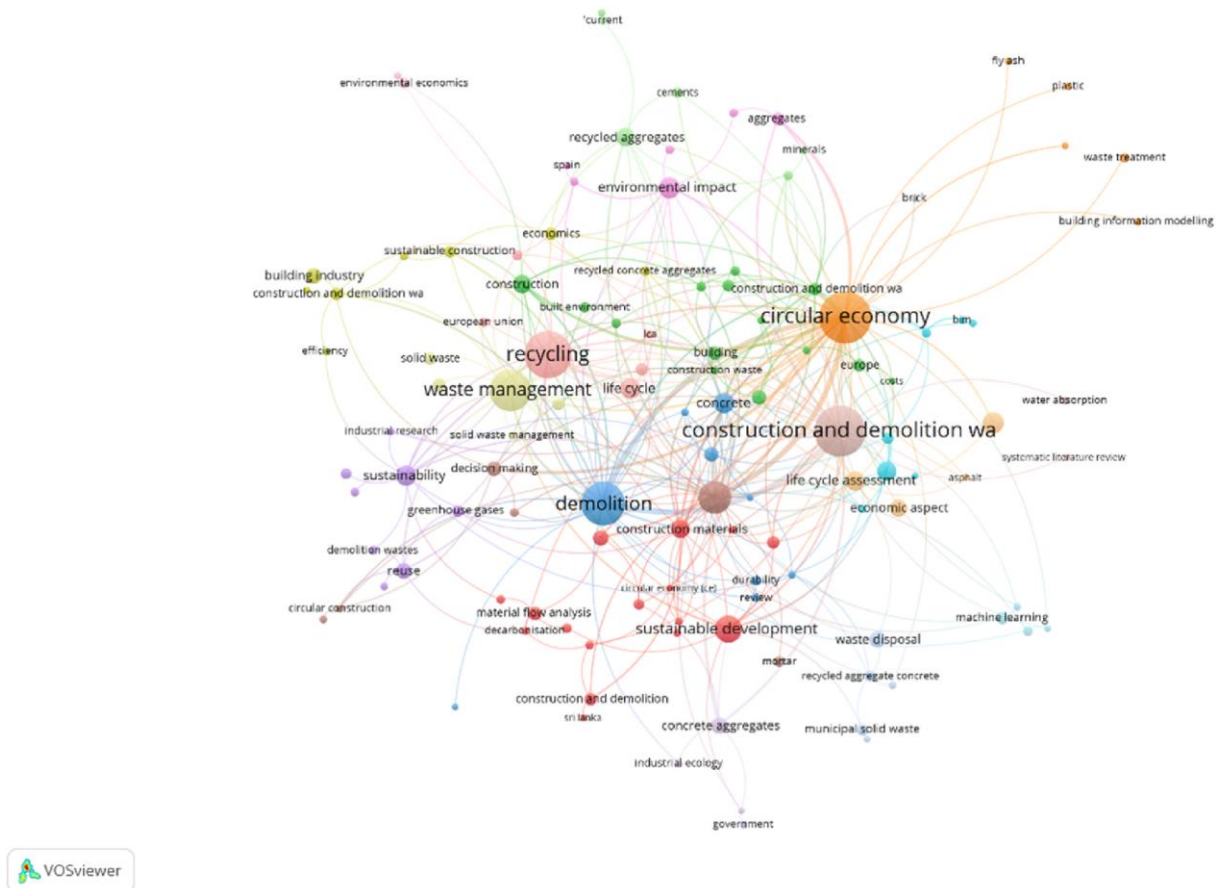


Figure I. 4: Visualisation du réseau pour l'analyse de la cooccurrence des mots-clés.

Thèmes principaux :

- *Recyclage et gestion des déchets :*

Le recyclage reste l'un des thèmes les plus importants et les plus interconnectés, comme le montre la fréquence élevée de mots-clés tels que granulats recyclés, béton et recyclage. La carte montre que l'accent est mis sur l'amélioration des pratiques de recyclage, en particulier pour le

béton et les granulats, qui constituent une part importante des déchets de C&D. En outre, la gestion des déchets et la réduction des décharges apparaissent comme des domaines critiques, reflétant les efforts en cours pour détourner les déchets des sites d'élimination et promouvoir la réutilisation des matériaux. Le défi de minimiser la dépendance à l'égard des décharges reste au cœur de l'adoption de l'EC, alors que la recherche continue d'explorer des stratégies innovantes pour augmenter les taux de recyclage et la récupération durable des matériaux.

- *Durabilité et l'économie circulaire :*

Le concept de durabilité est intrinsèquement lié aux principes de l'économie circulaire, comme le montrent les références fréquentes au développement durable, à la durabilité et à l'impact environnemental. La carte indique l'intérêt croissant pour l'évaluation de la manière dont les pratiques de gestion des déchets de C&D peuvent contribuer à la durabilité environnementale et économique à long terme. Le mot-clé économie circulaire est le pilier central de la recherche, avec des liens étroits avec l'analyse du cycle de vie (ACV), la faisabilité économique et les stratégies de réutilisation des matériaux. Cela implique un changement de paradigme dans la manière d'aborder la gestion des déchets, non seulement comme un problème d'élimination, mais aussi comme une opportunité d'optimiser l'efficacité des ressources et de réduire l'empreinte environnementale.

- *Matériaux de construction et pratiques de démolition :*

La récupération et la réutilisation des matériaux de construction, en particulier le béton, les agrégats et les matériaux de construction, constituent un autre axe de recherche important. La prédominance de mots-clés tels que « déchets de démolition », « matériaux recyclés » et « agrégats de construction » témoigne d'un effort rigoureux pour améliorer l'efficacité du recyclage et la qualité des matériaux. Cette démarche s'inscrit dans le cadre des objectifs mondiaux de développement durable, puisque les chercheurs étudient des méthodes visant à prolonger la durée de vie des matériaux de construction, à réduire les émissions de carbone intrinsèques et à promouvoir les flux circulaires de matériaux dans l'environnement bâti...

I.6 Discussions :

La transition vers une économie circulaire (EC) dans la gestion des déchets de construction et de démolition (C&DW) à l'aide de matériaux recyclés a pris une ampleur considérable ces dernières années, motivée par la nécessité d'atténuer les impacts environnementaux et d'améliorer l'efficacité des ressources dans l'environnement bâti. Le

secteur de la construction représentant une part substantielle de la production mondiale de déchets, il est devenu impératif de faire progresser les matériaux durables, l'utilisation efficace des ressources et les stratégies de réduction des déchets. Cette étude analyse systématiquement l'évolution de la recherche sur les principes d'EC dans la gestion des déchets de C&D, en identifiant les principaux contributeurs, les tendances thématiques dominantes, les cadres politiques, les avancées technologiques et les obstacles existants à la mise en œuvre. L'analyse bibliométrique fournit une vue d'ensemble du domaine, révélant des lacunes critiques et des opportunités émergentes qui requièrent une plus grande attention.

Les résultats indiquent une augmentation constante de l'intérêt des chercheurs pour la gestion des déchets de C&D pilotée par l'EC, en particulier dans des domaines tels que le recyclage, la réutilisation des matériaux et le développement durable. Toutefois, le contexte de la recherche reste quelque peu fragmenté, en particulier lorsqu'il s'agit de relever des défis spécifiques aux matériaux et d'intégrer des solutions numériques telles que la modélisation des données du bâtiment (BIM) et l'intelligence artificielle (IA) dans les cadres de gestion des déchets. En outre, bien que les cadres politiques jouent un rôle central dans l'élaboration des pratiques industrielles, les incohérences dans l'application des politiques et les contraintes économiques continuent d'entraver l'adoption généralisée. L'analyse bibliométrique met également en évidence les disparités régionales dans les résultats de la recherche, l'Espagne, le Royaume-Uni et la Chine étant en tête des contributions, tandis que Singapour et l'Irlande font preuve d'un impact élevé malgré des volumes de publication plus faibles. La nature interdisciplinaire du domaine est évidente dans le réseau d'auteurs et de revues influents, mais la recherche spécifique à l'ingénierie reste souvent déconnectée du contexte plus large du développement durable, ce qui limite les applications intersectorielles des stratégies d'écoconception.

Cette discussion remet en contexte les résultats bibliométriques dans la littérature existante, en établissant des comparaisons avec des études antérieures afin d'évaluer si la recherche actuelle répond de manière adéquate aux défis pratiques de l'industrie. En synthétisant les idées sur les tendances mondiales de la recherche, les défis spécifiques aux matériaux, l'intégration numérique et les obstacles à la mise en œuvre des politiques, cette section évalue de manière critique la trajectoire de l'adoption de l'EC dans la gestion des C&DW. L'objectif est de fournir une compréhension nuancée de la manière dont la recherche a évolué, des obstacles qui subsistent et des domaines sur lesquels les recherches futures devraient se concentrer pour combler les lacunes existantes. Cette étude apporte de nouvelles

perspectives sur l'évolution de la recherche en EC, en cartographiant les principales collaborations universitaires, les modèles de citation et les groupes thématiques, offrant ainsi une perspective plus holistique sur l'avenir de l'EC dans la gestion des déchets de C&D.

L'intégration des principes de l'économie circulaire (EC) utilisant des matériaux recyclés dans la gestion des déchets de construction et de démolition (C&DW) a fait l'objet d'une attention particulière ces dernières années, sous l'impulsion des efforts mondiaux visant à améliorer l'efficacité des ressources et la durabilité dans l'environnement bâti [1,2] , [3]. L'analyse bibliométrique des tendances mondiales de la recherche indique une augmentation constante des publications universitaires, en particulier au cours de la dernière décennie, ce qui reflète l'urgence de s'attaquer à la production de déchets et à la récupération des matériaux dans la construction [3,4]. Cette augmentation de la production de recherche, comme l'indiquent Türkeli et al. en 2018 [5] est largement influencée par les changements politiques, les avancées technologiques et les objectifs internationaux de durabilité, tels que le plan d'action de l'Union européenne pour l'économie circulaire et les objectifs de développement durable des Nations unies [5].

Plan d'action pour l'économie circulaire, qui vise à promouvoir l'efficacité des ressources et la réduction des déchets dans le secteur de la construction [6]. L'attention soutenue portée par les chercheurs à la gestion des déchets de C&D reflète la reconnaissance croissante par le secteur de la nécessité de minimiser les impacts environnementaux, d'optimiser l'utilisation des ressources et d'évoluer vers des pratiques de gestion des déchets plus durables [7]. Malgré cet élan, la recherche reste inégalement répartie entre les différentes régions, institutions et domaines thématiques, ce qui laisse supposer que certaines régions et certains sujets restent sous-explorés [8].

La répartition géographique des résultats de recherche révèle que les pays européens, en particulier l'Espagne, l'Italie et le Royaume-Uni, sont en tête des contributions aux études sur l'économie circulaire et les déchets de construction et de démolition, en raison de cadres réglementaires bien établis et d'un soutien institutionnel aux initiatives circulaires [8,9]. Ces résultats s'alignent sur des études antérieures qui ont identifié les pays d'Europe du Sud et de l'Ouest comme des pionniers dans la mise en œuvre de politiques d'EC, en grande partie en raison des réglementations de l'UE imposant des pratiques de construction durable et la récupération des matériaux [10].

Les réseaux de collaboration entre les chercheurs et les institutions mettent également en évidence la prédominance des universités européennes et nord-américaines, avec des liens de collaboration étroits entre les institutions du Royaume-Uni, des Pays-Bas et de l'Allemagne.

Malgré ces réseaux bien établis, les collaborations intercontinentales impliquant l'Asie, l'Afrique et l'Amérique latine restent relativement faibles, ce qui suggère une opportunité d'échange de connaissances et de transfert de technologies pour soutenir les transitions circulaires dans la construction. Les revues publiant des recherches en EC sur la gestion de la C&DW présentent des orientations thématiques distinctes. Les revues publiant des recherches en EC sur la gestion des déchets de construction et de démolition se concentrent principalement sur la durabilité, la récupération des matériaux et les évaluations de l'impact sur l'environnement [11]. Les publications à fort impact telles que *Journal of Cleaner Production*, *Ressources, Conservation & Recycling* et *Waste Management & Research* dominent le domaine, renforçant la nature interdisciplinaire de l'EC dans la construction. Ces revues ont contribué à faire avancer les discussions sur la récupération des matériaux, l'intégration des politiques et l'innovation numérique dans la gestion des déchets. Cependant, la présence limitée de revues axées sur l'ingénierie suggère une lacune potentielle dans la recherche traduisant les principes de l'EC en méthodologies de construction pratiques et en innovations technologiques [12,13]. En outre, la prédominance des publications axées sur la durabilité indique que les perspectives de politique et de gestion environnementale sont plus souvent abordées que les défis techniques dans les processus de réutilisation et de recyclage des déchets [14].

Des publications de premier plan, telles que le *Journal of Cleaner Production* et *Resources, Conservation & Recycling*, présentent fréquemment des études sur les agrégats recyclés, afin de minimiser les déchets de construction. Toutefois, la présence de recherches axées sur l'ingénierie reste limitée, ce qui indique un manque d'innovations techniques et d'applications pratiques de l'EC dans le secteur de la construction, comme l'ont montré Antwi-Afari et al. (2021) [12]. Cela met en évidence une opportunité pour la recherche future de combler le fossé entre les cadres politiques et les applications techniques, en veillant à ce que les stratégies d'EC dans la gestion des déchets de C&D soient à la fois solides sur le plan théorique et viables sur le plan pratique. Il sera essentiel de combler ce fossé en intégrant les perspectives de l'ingénierie, de la politique et de l'innovation numérique pour faire progresser l'adoption pratique des principes d'EC dans la gestion des déchets de C&D.

L'application des principes de l'économie circulaire (EC) à la gestion des déchets de construction et de démolition (C&DW) s'est principalement concentrée sur le recyclage du béton, étant donné sa présence importante dans les flux de C&DW et les méthodologies établies pour sa réutilisation. Des études ont largement exploré l'analyse du cycle de vie (ACV) des granulats de béton recyclé, soulignant à la fois les avantages environnementaux et les défis techniques associés à leur application dans les nouvelles constructions [15,16].

Cette approche correspond aux priorités de l'industrie, compte tenu de la prédominance volumétrique du béton et de la faisabilité de ses processus de recyclage. Dans ce contexte, il est essentiel de comprendre les propriétés et la durabilité des matériaux recyclés dans le béton, comme les granulats céramiques, car leur faible absorption d'eau améliore la durabilité du béton par rapport aux granulats naturels [17]. Inversement, d'autres matériaux tels que les plastiques, le bois et les métaux n'ont pas fait l'objet d'une attention équivalente dans la recherche en EC. Par exemple, le recyclage des plastiques provenant des déchets de C&D pose de nombreux problèmes, notamment la contamination, la dégradation et la diversité des types de plastiques, qui compliquent les efforts de tri et de traitement [18,19].

Conclusion :

L'intégration des principes de l'économie circulaire (EC) utilisant des matériaux recyclés dans la gestion des déchets de construction et de démolition (C&DW) représente une voie essentielle vers le développement durable dans l'environnement bâti. Cette étude, par le biais d'une analyse bibliométrique complète, a permis de mieux comprendre les tendances mondiales de la recherche, les contributeurs clés, les défis spécifiques aux matériaux, les cadres politiques et l'intégration des outils numériques dans le contexte de l'adoption de l'EC. À travers les différentes questions de recherche, les résultats mettent en évidence une reconnaissance croissante des pratiques circulaires, mais des défis importants persistent dans la traduction de ces principes en une application généralisée.

L'une des principales préoccupations est la répartition inégale des efforts de recherche, en particulier entre les économies développées et émergentes. Bien que les nations européennes aient fait des progrès considérables dans l'établissement de cadres réglementaires et la promotion de réseaux de collaboration, les économies émergentes sont toujours confrontées à une application insuffisante des politiques, à des contraintes financières et à des limitations technologiques. Cette disparité souligne la nécessité de stratégies adaptées qui tiennent compte des contextes locaux tout en encourageant le partage de connaissances et de bonnes pratiques au niveau international. Les défis spécifiques aux matériaux compliquent encore la mise en œuvre de l'EC. Bien que le recyclage du béton ait été largement étudié et intégré dans les pratiques de construction, d'autres composants critiques des déchets, tels que les plastiques, le bois traité et les métaux, restent sous-explorés. Pour combler ces lacunes spécifiques aux matériaux, il faudra des progrès dans les technologies de recyclage, des politiques de soutien et des incitations qui favorisent la diversification des applications de l'EC.

La recherche sur les méthodes alternatives de récupération des matériaux, telles que le recyclage chimique des plastiques, les traitements biologiques des déchets de bois et les techniques avancées de séparation des métaux, est essentielle pour surmonter ces obstacles. Les innovations numériques, notamment la modélisation des données du bâtiment (BIM) et l'intelligence artificielle, promettent d'améliorer l'efficacité des ressources et les pratiques de gestion des déchets. D'un point de vue politique, des cadres réglementaires et des incitations financières solides sont essentiels pour favoriser la mise en œuvre de l'EC à grande échelle. La collaboration internationale entre les décideurs politiques, les chercheurs et les leaders de l'industrie sera essentielle pour combler les lacunes politiques et technologiques qui entravent l'intégration de l'EC dans la construction.

Au-delà des avantages environnementaux, la transition vers une économie circulaire dans la gestion des déchets de C&D présente une opportunité économique significative, favorisant la création d'emplois, l'innovation industrielle et les économies financières à long terme. Le secteur de la construction peut favoriser la réduction des déchets tout en maximisant l'efficacité des ressources en alignant les cadres réglementaires, les avancées technologiques et les pratiques industrielles. Pour garantir des progrès significatifs, la collaboration interdisciplinaire et la recherche ciblée doivent continuer à combler les lacunes critiques identifiées dans cette étude. Cette transformation n'est pas seulement un impératif environnemental, mais aussi une opportunité économique et sociale de construire un environnement bâti plus résilient, durable et équitable pour les générations futures.

CHAPITRE II

*Les matériaux
recyclés utilisés dans
la construction*

Introduction :

Face aux enjeux environnementaux et à l'épuisement des ressources naturelles, le secteur de la construction s'oriente de plus en plus vers l'utilisation de matériaux recyclés. Ces matériaux, issus de déchets industriels et de démolition, offrent une alternative durable aux composants traditionnels tout en réduisant l'empreinte carbone des bâtiments. Leur intégration dans les bétons, les mortiers ou les structures permet non seulement de limiter les volumes de déchets enfouis, mais aussi de valoriser des sous-produits comme la cendre volante, les plastiques ou les métaux recyclés. Cette démarche s'inscrit dans une logique d'économie circulaire, où performance technique et respect de l'environnement deviennent indissociables.

II.1 Définition des déchets de démolition :

Les déchets de démolition sont les résidus générés lors de la déconstruction ou la démolition de bâtiments, routes, ponts ou autres infrastructures. Ils représentent une part importante des déchets du secteur de bâtiments et travaux publics (BTP), souvent regroupés sous le terme déchets de construction et de démolition (DCD).

II.1.1 Composition typique :

Ces déchets sont généralement classés en plusieurs catégories :

Déchets inertes :

Les déchets inertes sont des matériaux qui ne subissent aucune transformation physique, chimique ou biologique notable au fil du temps. Ils ne se décomposent pas, ne brûlent pas et ne réagissent pas avec d'autres substances présentes dans l'environnement. De ce fait, ils ne sont ni biodégradables ni nuisibles aux matériaux avoisinants, et ne présentent pas de risques pour la santé humaine ou pour l'environnement. Parmi les exemples courants de déchets inertes figurent le béton, les briques, la céramique et les matériaux issus des travaux d'excavation.

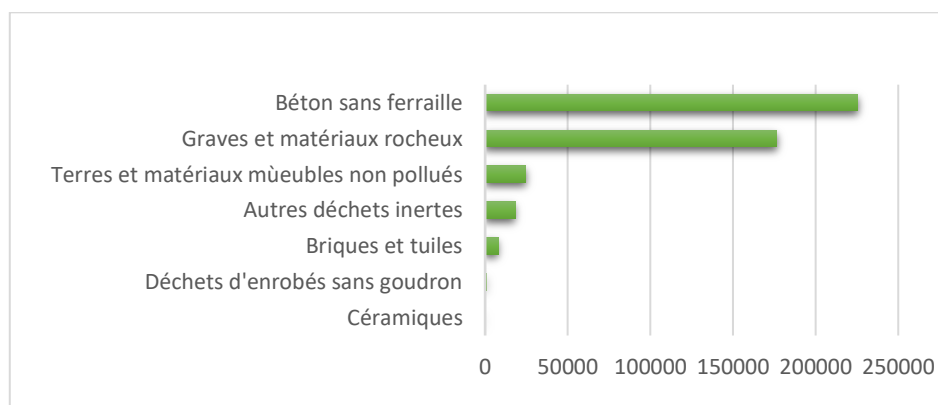


Figure II. 1 : Déchets inertes produits (en tonne).

Déchets non dangereux :

Les déchets non dangereux non inertes regroupent des matériaux comme le plastique, le bois, le verre, les métaux ou le carton. Ils ne présentent pas de caractéristiques de danger définies par la réglementation, sans pour autant répondre aux critères des déchets inertes ou dangereux.

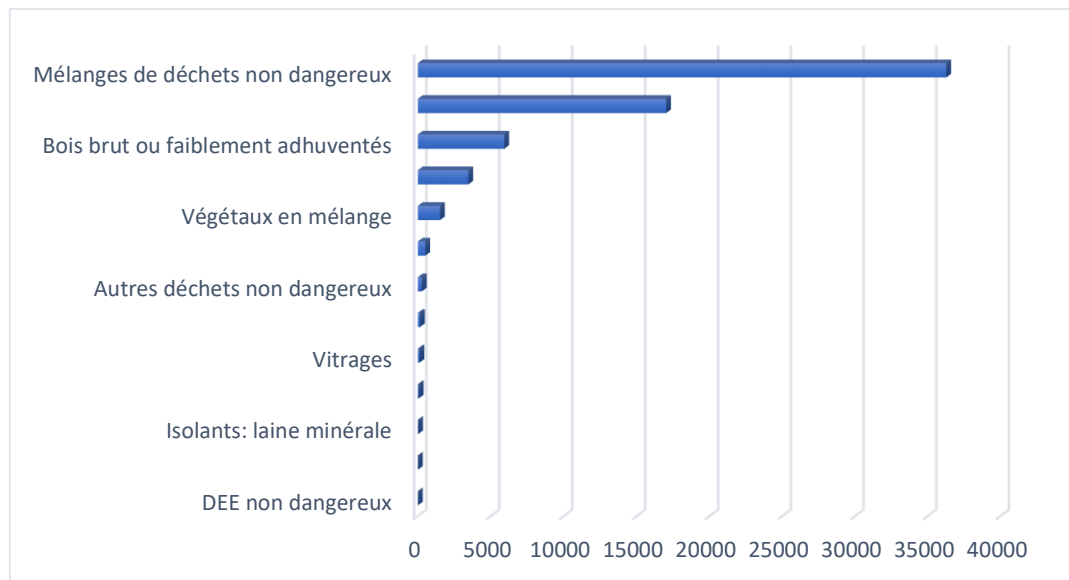


Figure II. 2: Déchets non dangereux (en tonne).

Résidus dangereux :

Les déchets dangereux sont ceux qui, en raison de leurs caractéristiques physiques, chimiques ou biologiques, présentent un risque potentiel pour la santé humaine et l'environnement. Dans le secteur de la construction, cela inclut des matériaux tels que les peintures, solvants, produits chimiques, ou encore l'amiante. Ces déchets sont classés comme dangereux car ils peuvent être explosifs, inflammables, irritants ou toxiques. Leur identification est facilitée par leur inscription dans des listes réglementaires spécifiques, ce qui permet d'assurer un traitement et une gestion adaptés pour limiter leur impact environnemental.

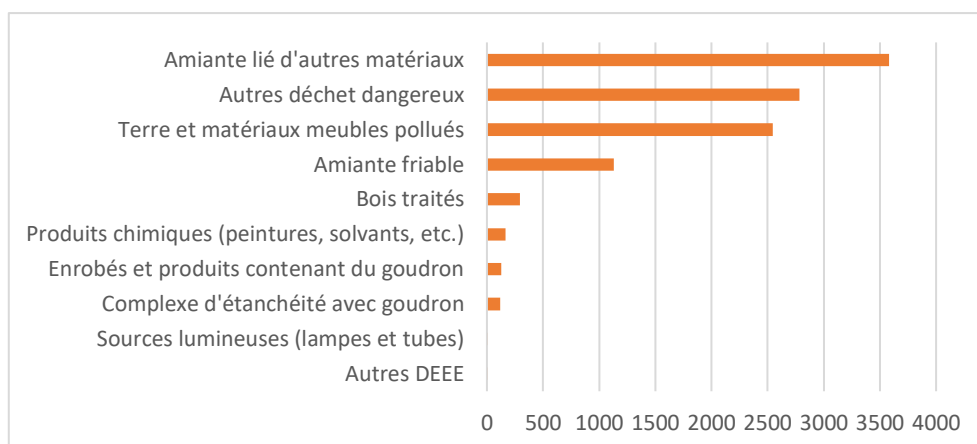


Figure II. 3: Déchets dangereux (en tonne).

II.1.2 Enjeux de gestion :

La gestion des déchets de démolition répond à plusieurs enjeux majeurs. Sur le plan environnemental, elle permet de réduire les volumes envoyés en décharge, de limiter la pollution des sols et des eaux, et de préserver les ressources naturelles grâce au réemploi ou au recyclage des matériaux. Économiquement, la valorisation de matériaux récupérés tels que le béton concassé, le bois réutilisé ou les métaux recyclés permet de réduire les coûts liés à la production et à la gestion des déchets. Enfin, les exigences réglementaires imposent le tri à la source, la traçabilité et le traitement adapté de ces déchets. Leur caractérisation et leur valorisation sous forme de granulats recyclés, de combustibles ou de matériaux de remblai contribuent ainsi à promouvoir une économie circulaire dans le secteur de la construction.

II.1.3 L'importance de la valorisation des matériaux de construction :

La valorisation des matériaux de construction s'impose comme un enjeu mondial face à la pression croissante exercée sur les ressources naturelles et à l'augmentation des déchets de construction et de démolition, qui représentent environ 30 à 50 % des déchets solides produits globalement selon le Programme des Nations unies pour l'environnement. Cette pratique, qui inclut le réemploi, le recyclage et la transformation des matériaux, permet de réduire considérablement l'empreinte environnementale du secteur du bâtiment, responsable de près de 37 % des émissions mondiales de CO₂ liées à l'énergie. Elle favorise également l'émergence d'une économie circulaire dans la construction, comme en témoignent des initiatives pionnières dans des pays comme les Pays-Bas, le Japon ou l'Allemagne, qui intègrent la valorisation dès la phase de conception. Néanmoins, des défis subsistent à l'échelle mondiale, notamment en matière de standardisation, de traçabilité des matériaux et d'accès aux technologies de

recyclage, ce qui exige une coopération internationale renforcée et des politiques publiques ambitieuses pour faire de la valorisation une norme plutôt qu'une exception.

II.1.4 Utilisation des déchets comme source de granulats recyclés :

Le recyclage des déchets DCD pour la production de granulats a suscité un intérêt croissant en tant que solution durable dans le secteur de la construction. Ces déchets incluent divers matériaux tels que le béton, les briques, les tuiles, l'asphalte, le bois et les métaux, issus des travaux de construction, de rénovation ou de démolition [20][21]. Le recyclage des DCD permet de réduire la pression sur les sites d'enfouissement, de préserver les ressources naturelles et de diminuer la consommation d'énergie liée à la production traditionnelle de granulats. Il présente également des avantages économiques, notamment par la réduction des coûts de matériaux et des frais de mise en décharge [17]. La qualité des granulats recyclés issus des DCD dépend de plusieurs facteurs, dont la nature des matériaux d'origine, le niveau de contamination, l'efficacité du tri et du traitement, ainsi que les mesures de contrôle de qualité appliquées [22]. Des procédés adaptés de tri, de concassage et de criblage sont indispensables pour obtenir des granulats aux propriétés compatibles avec la fabrication du béton [23].

Toutefois, la variabilité des matériaux, la présence de contaminants et les limites des technologies de recyclage peuvent compromettre la qualité et la constance des granulats, influençant ainsi la performance du béton [22]. Malgré ces défis, de nombreuses études ont confirmé la faisabilité de l'utilisation de granulats recyclés de DCD dans le béton. La recherche s'est concentrée sur l'évaluation de leurs propriétés mécaniques, de durabilité et de comportement à long terme [24]. Par ailleurs, les progrès technologiques et l'amélioration des procédures de contrôle qualité ont renforcé la fiabilité de ces matériaux pour une utilisation dans la production de béton [25].



Figure II. 4: Échantillons de déchets de démolition [20].

La **Figure II. 4** illustre la diversité des matériaux générés lors des opérations de démolition. Ces échantillons peuvent inclure des fragments de béton, de briques, de tuiles, d'asphalte, de métaux, de bois ou encore de plastique. L'image met en évidence l'hétérogénéité de ces déchets, tant sur le plan granulométrique que compositionnel, ce qui reflète les défis associés à leur tri, leur traitement et leur valorisation. Cette diversité souligne l'importance de procédés de recyclage adaptés pour produire des granulats de qualité à partir des déchets de DCD. Elle permet également de comprendre la nature des matériaux réutilisables dans le cadre d'une économie circulaire appliquée au secteur du bâtiment.

II.2 Les principaux matériaux recyclables dans le BTP :

II.2.1 Recyclage des bétons :

Les granulats de béton recyclé (GBR) représentent une solution prometteuse pour valoriser les déchets de DCD en matériaux de construction durables. Toutefois, bien que des normes existent dans plusieurs pays pour encadrer leur recyclage et leur utilisation, ces exigences varient considérablement d'un pays à l'autre, ce qui limite l'adoption généralisée de ces matériaux. L'étude vise à combler cette lacune en compilant et en analysant de manière exhaustive les normes internationales, tout en évaluant les méthodes de production, les procédés de traitement et les technologies de broyage des GBRs en explorant l'impact de différents traitements innovants sur la qualité et la performance des granulats.

Les propriétés physico-mécaniques :

Les propriétés physico-mécaniques des GBRs varient largement en raison des différences dans leur composition, leurs méthodes de traitement et de production. Ces variations influencent directement la performance du béton recyclé. Les GBRs présentent des résistances mécaniques variables (**Tableau II.1** et des caractéristiques physiques (**Tableau II.2**). Leurs performances sont généralement inférieures à celles des granulats naturels en raison de la présence de mortier résiduel. Le type de concassage (**Figure II.5**) influence aussi la forme des granulats, les concasseurs à mâchoires produisant des particules plus angulaires que les concasseurs à percussion. Enfin, bien que l'augmentation de la teneur en GBR réduise généralement la résistance du béton, un remplacement partiel contrôlé (jusqu'à 25 %) peut maintenir des performances comparables à celles du béton traditionnel [26–28].

Tableau II. 1 : Propriétés mécaniques.

Propriété	Comportement du béton recyclé
Résistance à la compression	Légèrement inférieure (environ 10 à 25 % en moins) que celle d'un béton classique, surtout à forte substitution (>50%).
Résistance à la traction	Inférieure à celle du béton ordinaire, en raison de la porosité plus élevée des granulats recyclés.
Module d'élasticité	Plus faible que le béton conventionnel, dû à une rigidité moindre des granulats recyclés.
Ductilité	Légèrement meilleure dans certains cas, grâce à une fissuration plus progressive.
Durabilité	Réduite si non traité ou mal formulé (perméabilité plus élevée, sensibilité aux cycles gel/dégel).

Tableau II. 2: Propriétés physiques.

Propriétés	Comportement du béton recyclé
Masse volumique	Inférieure au béton traditionnel (env. 5 à 15 % de moins), car les granulats recyclés sont plus poreux.
Porosité	Plus élevée, ce qui affecte la durabilité et la résistance aux agents agressifs (chlorures, sulfates).
Absorption d'eau	Plus importante, les granulats recyclés absorbant plus d'humidité que les granulats naturels.
Conductivité thermique	Légèrement plus faible, mais dépend de la compacité et du taux de substitution.

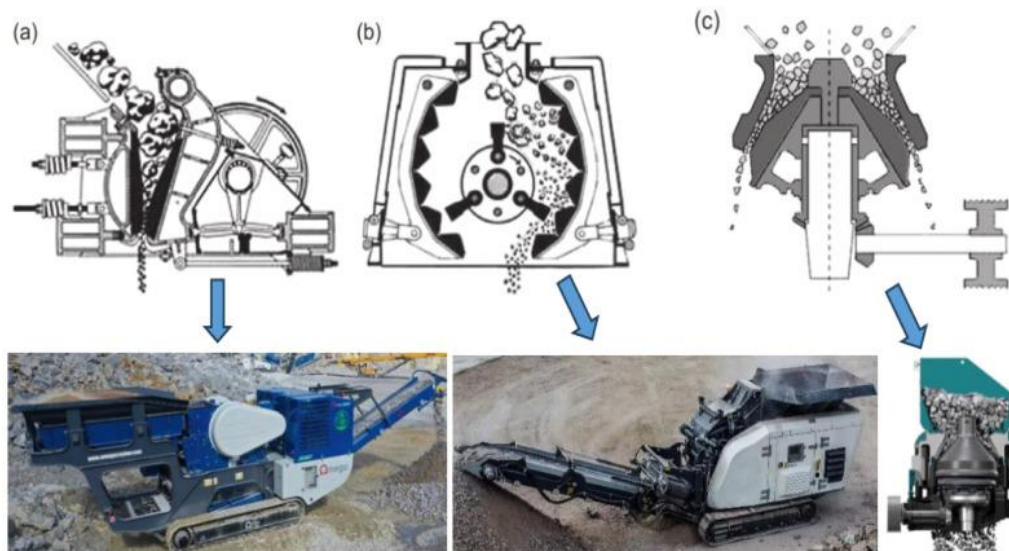


Figure II. 5: Principes de fonctionnement des différents concasseurs rencontrés sur les plateformes de recyclage : (a) concasseur à mâchoires (à gauche), (b) concasseur à percussion (au centre) et (c) concasseur à cône (à droite) [Lauritzen, et Jacobsen, 1991] [29,30].

Avantages environnementaux :

L'utilisation du béton recyclé dans les infrastructures présente de nombreux avantages environnementaux majeurs. En remplaçant les GBRs, on réduit considérablement la consommation d'énergie et les émissions de CO₂ liées à la production de béton conventionnel. L'utilisation de granulats recyclés peut entraîner une réduction des émissions de CO₂ allant jusqu'à 90 % par rapport au béton traditionnel. De plus, le béton recyclé contribue à la diminution des déchets issus de la démolition et de la construction, réduisant ainsi la pression sur les sites d'enfouissement tout en promouvant une économie circulaire. L'entreprise australienne NTEX Code Red, par exemple, a démontré l'efficacité de ces pratiques en atteignant un taux de récupération des déchets de 93 % sur ses projets de démolition. L'intégration de granulats recyclés permet également de limiter l'extraction de ressources naturelles, réduisant les impacts environnementaux associés à l'exploitation de carrières et au transport des matériaux. Ainsi, le béton recyclé s'impose comme une solution durable et responsable, soutenue à la fois par les données scientifiques et les initiatives industrielles concrètes.

Application des granulats recyclés :

Le **Tableau II.3** présente les différentes applications des granulats recyclés en fonction de leurs dimensions. Les granulats de dimension 0/4 mm sont principalement utilisés dans la

fabrication de mortiers et d'enduits, offrant ainsi une solution pour les travaux de finition. Ceux compris entre 0/12 et 0/32 mm sont adaptés pour des applications telles que l'assise en chaussée et la couche de roulement dans les enrobés, contribuant à la durabilité des infrastructures routières. Les granulats de 0/32 à 0/80 mm sont principalement utilisés pour les remblais, une application nécessitant des matériaux de plus grande taille. Les granulats de 6/14 mm sont employés dans la production de béton hydraulique pour des éléments comme les parpaings et les canalisations, ainsi que pour le béton prêt à l'emploi. Les granulats de dimensions 40/70 à 60/120 mm sont utilisés comme ballast de voie, essentiel pour les chemins de fer. Enfin, les granulats de 0/125 mm sont utilisés dans les aménagements décoratifs, apportant une touche esthétique tout en favorisant le recyclage des matériaux. Ce tableau montre la diversité des applications des granulats recyclés selon leur taille, offrant des solutions adaptées à différents besoins dans la construction. Ce tableau illustre ainsi la polyvalence des granulats recyclés et leur contribution à une construction plus durable.

Tableau II. 3: Applications des granulats utilisés en construction en fonction des dimensions des granulats.

Granulats recyclés (mm)	Utilisation
0/4	-Mortier - Enduit
0/12 à 0/32	-Assise en chaussée -Couche de roulement dans la composition dans les enrobés
0/32 à 0/80	-Remblais
6/14	-Béton hydraulique (parpaings, canalisation) -Béton prêt à l'emploi
40/70 à 60/120	-Ballast de voie
0/125	-Aménagements décoratifs

II.2.2 Recyclage des déchets en plastique :

Les plastiques, devenus omniprésents dans notre quotidien en raison de leur légèreté, durabilité et faible coût, génèrent une quantité croissante de déchets. La production mondiale atteignait 288 millions de tonnes, dont plus de la moitié était destinée à des produits à usage

unique. Toutefois, seuls 7 % des déchets plastiques sont recyclés, la majorité étant enfouie ou incinérée, ce qui pose un grave problème environnemental. La plupart des plastiques sont non biodégradables et peuvent libérer des substances toxiques comme les phtalates, affectant la santé humaine et les écosystèmes. En Algérie, la production de déchets plastiques augmente, notamment en raison de la généralisation des produits emballés. Face à cela, la valorisation des déchets plastiques dans le secteur du bâtiment, par substitution partielle ou totale des granulats dans les mortiers et bétons, est une solution durable encore peu développée localement, mais prometteuse tant sur le plan environnemental qu'économique.

Processus de recyclage :

Le recyclage du plastique issu de la démolition passe par plusieurs étapes clés. D'abord, les matériaux plastiques (comme le PVC, le PE, le PP) sont triés sur le site de démolition ou en centre de tri, puis acheminés vers des installations spécialisées. Là, ils sont séparés des autres déchets (bois, métal, béton), broyés et nettoyés pour enlever les impuretés. Ensuite, ces plastiques sont soit recyclés mécaniquement (fondus et transformés en granulés réutilisables dans la fabrication de nouveaux produits), soit, plus rarement, recyclés chimiquement pour produire des matières premières ou de l'énergie. Ce processus permet de réduire la quantité de déchets envoyés en décharge et de réintégrer les plastiques dans une chaîne de production, tout en faisant face à des défis comme la contamination des matériaux ou l'hétérogénéité des plastiques présents dans les bâtiments anciens.

Les déchets plastiques et leurs applications :

Parmi les différents types d'approches de la gestion des déchets, on cite la réutilisation des matières plastiques recyclées dans l'industrie de la construction, qui est considérée comme une méthode idéale pour l'élimination des déchets plastiques.

Divers types des matières recyclables d'origine industrielle sont actuellement utilisées dans les applications de génie civil indiqué dans le **Tableau II.4** :

Tableau II. 4: Principaux plastiques recyclés issus de la démolition.

Type de plastique	Nom complet	Usages dans la construction	Applications après recyclage
PVC	Polychlorure de vinyle	Fenêtres, portes, tuyauteries, câbles électriques, revêtements de sol	Tuyauterie, bardages, panneaux de construction, mobilier urbain
PEHD	Polyéthylène haute densité	Conduites d'eau, réservoirs, gaines, contenants industriels	Conduits techniques, éléments de coffrage, palettes, containers
PP	Polypropylène	Fixations, équipements sanitaires, fibres textiles, gaines	Produits d'isolation, fibres renforcées, accessoires de chantier
PS / PSE	Polystyrène (expansé ou non)	Isolation thermique, coffrages perdus, dalles flottantes	Panneaux isolants recyclés, mortiers allégés, remblai léger
PET	Polyéthylène téréphtalate	Textiles techniques, parfois dans revêtements ou vitrages modernes	Fibres textiles, isolants thermiques, additifs pour mortiers

Les propriétés physico-mécaniques :

Les plastiques recyclés incorporés dans les matériaux de construction présentent des propriétés mécaniques et physiques variables par rapport aux plastiques vierges. Leur résistance à la traction et à la compression est souvent réduite en raison de la dégradation des chaînes polymériques lors du processus de recyclage [31]. Toutefois, certains types de plastiques recyclés, notamment lorsqu'ils sont intégrés dans des mortiers ou bétons, peuvent améliorer la durabilité face aux cycles gel-dégel, ce qui les rend intéressants pour des applications en milieux exposés [32]. Le recyclage peut aussi altérer le module d'élasticité du matériau, réduisant sa rigidité. Par ailleurs, les plastiques recyclés influencent la porosité des composites dans lesquels ils sont intégrés, entraînant souvent une augmentation de l'absorption d'eau, ce qui affecte leur comportement en environnement humide [33]. Ces facteurs doivent être soigneusement pris en compte dans le choix des formulations pour garantir des performances optimales.

L'intégration des plastiques recyclés dans les structures et infrastructures est une stratégie de plus en plus explorée pour répondre aux exigences de durabilité environnementale tout en valorisant les déchets polymères. Cette approche présente des avantages écologiques notables, notamment la réduction des volumes de déchets plastiques et la limitation de l'extraction des ressources naturelles. Toutefois, leur usage dans le béton ou les mortiers modifie significativement les propriétés mécaniques et la durabilité des matériaux.

II.2.3 Métaux recyclés :

Les métaux recyclés issus de la démolition sont des matériaux clés dans l'économie circulaire du bâtiment. Ils sont récupérés à partir de structures métalliques, armatures en béton armé, conduites, tôles, équipements et charpentes.

Processus de recyclage :

Le recyclage des métaux issus du BTP repose sur plusieurs étapes :

- Collecte et tri : Les métaux sont récupérés à partir des structures démolies (poutres, armatures, câblages, canalisations) et triés en fonction de leur nature et de leur pureté.
- Broyage et séparation : Une fois triés, les déchets métalliques sont broyés et séparés par des procédés magnétiques (pour les ferreux) ou par courants de Foucault (pour les non-ferreux comme l'aluminium et le cuivre).
- Fusion et purification : Les métaux sont fondus dans des hauts-fourneaux, puis purifiés avant d'être transformés en lingots, bobines ou barres prêtes à être réutilisées.

Les principaux métaux recyclés issus de la démolition :

Les métaux récupérés lors de la démolition de bâtiments sont majoritairement l'acier, l'aluminium, le cuivre, le plomb, le zinc et l'inox. Ces métaux recyclés jouent un rôle clé dans la construction durable, en réduisant les déchets, en économisant l'énergie, et en réintégrant des matériaux performants dans de nouvelles utilisations.

Tableau II. 5: synthèse des principaux métaux recyclés issus de la démolition, leurs caractéristiques et les applications.

Métal	Source principale lors de la démolition	Forme récupérée	Potentiel de recyclage	Usage après recyclage	Avantages
Acier	Armatures béton, poutres, charpentes, rails.	Ferraille, barres, tôles.	Très élevé (recyclable à 100%)	Structures métalliques, barres d'armature.	Résistance, durabilité, économie d'énergie.
Aluminium	Menuiseries (fenêtres, portes), bardages, câbles.	Profilés, feuilles, copeaux.	Très élevé (recyclable à l'infini)	Fenêtres, bardages, tôles, éléments décoratifs.	Léger, anticorrosion, recyclable à l'infini.
Cuivre	Câbles électriques, tuyaux, systèmes de chauffage.	Fils, tubes, chutes.	Élevé, très recherché	Câblage, plomberie, composants électroniques.	Très bonne conductivité, valeur économique élevée.
Plomb	Anciennes canalisations, revêtements anti-bruit ou anti-radiation.	Tuyaux, plaques, fragments.	Moyen (usage réglementé)	Usage médical ou industriel spécifique (ex. radiologie)	Résistant aux intempéries, longue durée de vie.
Zinc	Toitures, descentes pluviales, bardages.	Plaques, gouttières.	Élevé	Toitures, gouttières, éléments de couverture.	Masse volumique élevée, mais usage réglementé.
Inox	Cuisines, équipements sanitaires, escaliers.	Tubes, plaques, visseries.	Élevé	Garde-corps, mobilier urbain, équipements sanitaires.	Esthétique, résistance à la corrosion.

Le recyclage des métaux issus de la démolition offre de nombreux avantages, tant sur le plan environnemental qu'économique. Voici comment il contribue à économiser de l'énergie et à préserver les ressources naturelles :

Économie d'énergie

Le processus de recyclage des métaux, contrairement à leur extraction et leur production à partir de matières premières vierges, nécessite beaucoup moins d'énergie. Par exemple :

- **Acier** : La production d'acier **recyclé nécessite environ 60 à 74 % moins d'énergie que** la production d'acier à partir de minerai de fer. Le recyclage réduit donc considérablement l'empreinte énergétique de ce métal.
- **Aluminium** : Le recyclage de l'aluminium consomme **environ 95 % moins d'énergie** que la production à partir de la bauxite. C'est l'un des métaux les plus énergivores à

produire à partir de matières premières, ce qui rend son recyclage particulièrement avantageux.

- **Cuivre** : Le recyclage du cuivre permet de réduire la consommation d'énergie de plus de 85 % par rapport à l'extraction minière et la production primaire.

En réduisant l'énergie nécessaire à la production des métaux recyclés, les émissions de gaz à effet de serre associées à ces processus, sont également diminuées, ce qui aide à combattre le changement climatique.

Préservation des ressources naturelles :

Les métaux recyclés permettent de réduire la pression exercée sur les ressources naturelles :

- **Moins d'extraction minière** : L'extraction des métaux nécessite de creuser des mines, d'utiliser de l'eau, des produits chimiques et des combustibles fossiles. Le recyclage des métaux réduit la dépendance à ces processus d'extraction, contribuant ainsi à préserver les réserves naturelles de minéraux.
- **Économie circulaire** : Les métaux recyclés sont réutilisés dans de nouvelles constructions ou produits, ce qui réduit le besoin de puiser davantage dans les ressources naturelles limitées. Par exemple, les métaux comme l'acier, l'aluminium et le cuivre peuvent être recyclés à l'infini sans perte significative de leurs propriétés.
- **Réduction des déchets** : Le recyclage aide à diminuer la quantité de déchets envoyés en décharge, notamment dans le cadre de la démolition de bâtiments. Ce processus soutient intr matériaux ne sont pas simplement jetés après usage mais sont réintégrés dans de nouveaux produits.

Réduction de l'impact environnemental :

Outre les économies d'énergie et la préservation des ressources, le recyclage des métaux permet aussi de réduire la pollution. Les activités minières et la production de métaux à partir de matières premières vierges génèrent souvent des pollutions de l'air, de l'eau et du sol. Le recyclage, en utilisant des matériaux déjà extraits, contribue à une diminution de ces pollutions.

II.2.4 Le verre recyclé :

Le verre recyclé de démolition fait partie des matériaux récupérés lors de la démolition des bâtiments, en particulier dans les fenêtres, les portes et les cloisons. Le recyclage du verre offre de nombreux avantages environnementaux, car il permet de réduire la consommation de nouvelles ressources et la production de déchets. Le processus de recyclage du verre commence par sa collecte, son nettoyage et sa réduction en morceaux. Ensuite, le verre est fondu pour être

reformé en nouveaux produits, tels que des fenêtres, des bouteilles, des pavés ou même des matériaux de construction, comme des isolants thermiques ou des revêtements de sol.

Le verre est recyclable à 100 %, ce qui signifie qu'il peut être réutilisé indéfiniment sans perdre ses qualités. Cela permet d'économiser de l'énergie, car le recyclage du verre nécessite moins d'énergie que la production de verre neuf à partir de sable, de soude et de calcaire. De plus, le recyclage du verre aide à réduire les émissions de gaz à effet de serre et à limiter l'exploitation des ressources naturelles. Ce matériau recyclé joue un rôle clé dans la construction durable, contribuant à une économie circulaire en réduisant la quantité de déchets envoyés en décharge et en réintégrant le verre dans le cycle de production.

Les avancées technologiques :

Le verre permet également d'optimiser son utilisation dans la construction durable.

Par exemple :

- **Le verre autonettoyant** : Grâce à un revêtement photocatalytique, il empêche l'accumulation de saletés et limite les coûts d'entretien des bâtiments.
- **Le vitrage photovoltaïque** : Il intègre des cellules solaires transparentes capables de produire de l'énergie tout en offrant une isolation thermique performante.
- **Le béton translucide** : Ce matériau intègre des fibres optiques ou des granulats de verre recyclé, permettant de diffuser la lumière naturelle à l'intérieur des bâtiments et de réduire la consommation énergétique liée à l'éclairage artificiel.

Le recyclage du verre contribue ainsi à la réduction des déchets, à la préservation des ressources naturelles et à l'amélioration des performances énergétiques des constructions

II.2.5 Le bois recyclé :

Le recyclage du bois de démolition est un enjeu majeur dans la gestion durable des déchets du bâtiment. Lors de la démolition ou de la rénovation de bâtiments, on retrouve du bois sous diverses formes : charpentes, planchers, menuiseries, palettes, coffrages ou panneaux. Ce bois peut être trié, nettoyé et orienté vers différentes filières selon son état, son traitement et son origine.

Le bois non traité ou faiblement contaminé peut être réutilisé directement dans la construction, l'ameublement ou pour fabriquer des produits dérivés comme des panneaux de particules ou des isolants. Le bois trop dégradé ou traité (par des peintures, vernis, fongicides) est généralement valorisé énergétiquement, il est broyé et utilisé comme combustible dans les chaufferies industrielles ou les centrales biomasse.

Le recyclage du bois permet de réduire les déchets, de préserver les forêts en limitant la coupe de bois neuf, et de réduire les émissions de CO₂, puisque le bois stocke du carbone. C'est une ressource renouvelable dont la valorisation contribue à l'économie circulaire dans le secteur du BTP, à condition qu'un tri rigoureux soit effectué pour distinguer les bois réutilisables des bois pollués ou dangereux.

Les propriétés physico-mécaniques :

Les propriétés physico-mécaniques du bois recyclé de démolition dépendent fortement de son origine, de son état de conservation, de son traitement antérieur (peint, verni, traité chimiquement), et de l'essence de bois (résineux, feuillu) (**Tableau II.6 et II.7**). Comparé au bois neuf, le bois de réemploi ou recyclé présente des variations de performance mais peut rester tout à fait adapté à certaines utilisations, notamment en structure légère, en aménagement intérieur ou en mobilier.

Tableau II. 6: Propriétés mécaniques.

Propriétés	Comportement du bois recyclé
Résistance à la compression	Souvent diminuée si le bois est fissuré ou vermoulu, mais acceptable pour des usages non structurels.
Résistance à la traction/flexion	Réduite si le bois a été exposé à l'humidité ou s'il présente des nœuds ou des défauts.
Dureté	Variable selon l'essence ; le bois dur conserve sa résistance, sauf en cas de pourriture.
Élasticité	Peut diminuer si le bois a vieilli ou a été trop sec ; certaines fibres deviennent cassantes.
Résilience	Faible si le bois est sec et ancien ; sensible aux chocs s'il n'est pas bien conservé.

Tableau II. 7: Propriétés physiques.

Propriété	Comportement du bois recyclé
Densité	Inchangée si le bois est sain ; légère baisse si dégradée par l'humidité ou les insectes.
Hygroscopicité	Augmentée si le bois a perdu sa protection (traitement ou finition) ; absorbe plus l'humidité.
Conductivité thermique	Reste faible comme le bois neuf ; bon isolant naturel.
Conductivité électrique	Faible, mais augmente si le bois est humide.

II.2.6 Sous-produits industriels (La cendre volante (CV)) :

L'utilisation de sous-produits industriels tels que la cendre volante (CV) dans la fabrication du béton constitue une stratégie efficace pour améliorer la durabilité tout en réduisant l'impact environnemental du secteur de la construction. Résidu issu de la combustion du charbon dans les centrales thermiques, la cendre volante est riche en silice et en alumine, ce qui lui confère des propriétés pouzzolaniques intéressantes lorsqu'elle est utilisée en substitution partielle du ciment Portland. Elle permet notamment de réduire les émissions de CO₂ liées à la production de ciment, tout en améliorant la microstructure du béton, particulièrement dans la zone de transition interfaciale (ITZ) [34]. L'ajout de CV améliore également la résistance à la pénétration des chlorures, la durabilité face aux cycles gel/dégel, et diminue la perméabilité globale du béton. Des chercheurs ont montré des performances optimales en termes de résistance mécanique et de longévité pour des dosages allant jusqu'à 30 %. D'autres chercheurs indiquent que le béton devient ainsi plus durable, économique et respectueux de l'environnement en intégrant des sous-produits comme la CV, répondant aux exigences des constructions modernes tout en valorisant des déchets industriels.

Utilisation dans les mélanges de béton :

L'intégration de CV dans le mélange du béton est une pratique largement répandue pour améliorer à la fois la performance mécanique et la durabilité du matériau. Utilisée comme substitut partiel du ciment Portland, généralement entre 15 % et 30 %, la CV réagit avec la chaux libérée par l'hydratation du ciment pour former des composés cimentaires supplémentaires (C-C-S), contribuant ainsi à densifier la matrice du béton [34]. Cette réaction pouzzolanique améliore les propriétés à long terme, notamment la résistance à la compression,

la perméabilité, et la résistance aux attaques chimiques comme les sulfates. De plus, l'ajout de CV réduit la chaleur d'hydratation, ce qui est particulièrement utile pour les structures massives. Sur le plan environnemental, cette substitution permet de réduire les émissions de CO₂ associées à la production de clinker, et de valoriser un déchet industriel issu des centrales thermiques à charbon. En termes pratiques, la CV améliore également la maniabilité du béton frais en agissant comme lubrifiant naturel grâce à sa finesse, tout en diminuant le rapport eau-ciment nécessaire. Ces avantages font de la cendre volante un ingrédient stratégique pour la formulation de bétons performants, durables et écologiques.

II.2.7 Les composites :

Les composites jouent un rôle clé dans le recyclage des matériaux de construction en combinant plusieurs matériaux pour obtenir des performances optimisées. Ils peuvent intégrer des fibres naturelles (lin, chanvre, jute) ou des fibres synthétiques issues du recyclage (carbone, verre). Les composites recyclés permettent de réduire la dépendance aux matières premières vierges tout en offrant des solutions plus légères et durables pour les structures du BTP.

Les innovations dans le domaine des composites permettent d'incorporer des déchets industriels et agricoles dans leur fabrication. Par exemple, des composites à base de biochar et de résine recyclée sont développés pour améliorer la résistance mécanique et thermique des matériaux de construction. De plus, ces composites peuvent être conçus pour être démontables et réutilisables, s'inscrivant ainsi dans une logique d'économie circulaire. Leur rôle dans le recyclage et la construction durable :

Optimisation des ressources et réduction des déchets :

L'utilisation de composites recyclés permet de limiter le gaspillage des matériaux tout en leur offrant une seconde vie. Par exemple, les fibres de carbone et de verre issues de chutes industrielles ou de composants en fin de vie peuvent être réintégrées dans de nouveaux composites.

Intégration des fibres naturelles pour une empreinte carbone réduite

L'utilisation de fibres naturelles comme le lin, le chanvre, la jute ou encore les déchets agricoles dans les composites permet de réduire la dépendance aux fibres synthétiques et aux matériaux non renouvelables. Ces composites biosourcés sont de plus en plus utilisés pour des applications structurelles et d'isolation dans le bâtiment.

Durabilité et résistance accrue :

Grâce à leurs propriétés mécaniques optimisées, les composites permettent de concevoir des matériaux de construction plus résistants et plus légers. Cela contribue à réduire les coûts de transport, à améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments et à prolonger la durée de vie des infrastructures.

Applications dans l'économie circulaire :

Des technologies émergentes facilitent le recyclage des composites en séparant les fibres et la résine, rendant possible leur réutilisation dans de nouveaux matériaux. Par exemple, des procédés thermochimiques permettent de récupérer les fibres de carbone sans altérer leurs propriétés, ce qui ouvre la voie à une construction plus durable et circulaire.

Conclusion :

L'utilisation des matériaux recyclés issus de la démolition représente une avancée majeure vers une construction plus durable et respectueuse de l'environnement. En valorisant ces déchets, on réduit considérablement la pression sur les ressources naturelles, les volumes de mise en décharge et les émissions de gaz à effet de serre. Bien que ces matériaux présentent des défis techniques, notamment en termes de performance mécanique et de durabilité, les recherches actuelles et les technologies de traitement permettent d'en améliorer la qualité. Intégrés intelligemment dans les projets de construction, les matériaux recyclés offrent une alternative viable aux matériaux traditionnels, s'inscrivant pleinement dans une logique d'économie circulaire et de transition écologique du secteur du bâtiment.

CHAPITRE III

Valorisation des GBRs vers une construction durable

Introduction :

Le béton demeure le matériau de construction le plus largement utilisé à l'échelle mondiale, bien que sa production entraîne des impacts environnementaux significatifs, notamment en termes d'émissions de carbone et d'épuisement des ressources naturelles. Face à ces enjeux, l'utilisation de matériaux recyclés, tels que les granulats de béton recyclé (GBR) issus des déchets de construction et de démolition (DCD), apparaît comme une solution durable pour atténuer l'empreinte écologique du béton, tout en contribuant à l'amélioration de ses propriétés mécaniques et de sa durabilité [35]. Le secteur de la construction figure parmi les plus grands consommateurs de ressources naturelles. La production mondiale de granulats vierges est passée de 21 milliards de tonnes en 2007 à 50 milliards de tonnes en 2017, soit une hausse de 58 %, et devrait atteindre 60 milliards de tonnes d'ici 2030 selon les projections [36]. La Chine en est le principal consommateur avec 40 % de la demande mondiale, suivie par l'Inde (10 %) et d'autres pays asiatiques tels que l'Indonésie, la Malaisie et la Thaïlande représentant ensemble 16 %. Les autres régions consommatrices incluent la Turquie (0,96 %), l'Afrique (8 %), l'Europe et l'Association européenne de libre-échange (AELE) (6 %), les États-Unis (4,8 %), l'Amérique centrale et du Sud (4 %), le Moyen-Orient (5,6 %) ainsi que la Russie et les pays de la Communauté des États indépendants (CEI) (5 %) [36–38], comme le montre la Figure III.1.

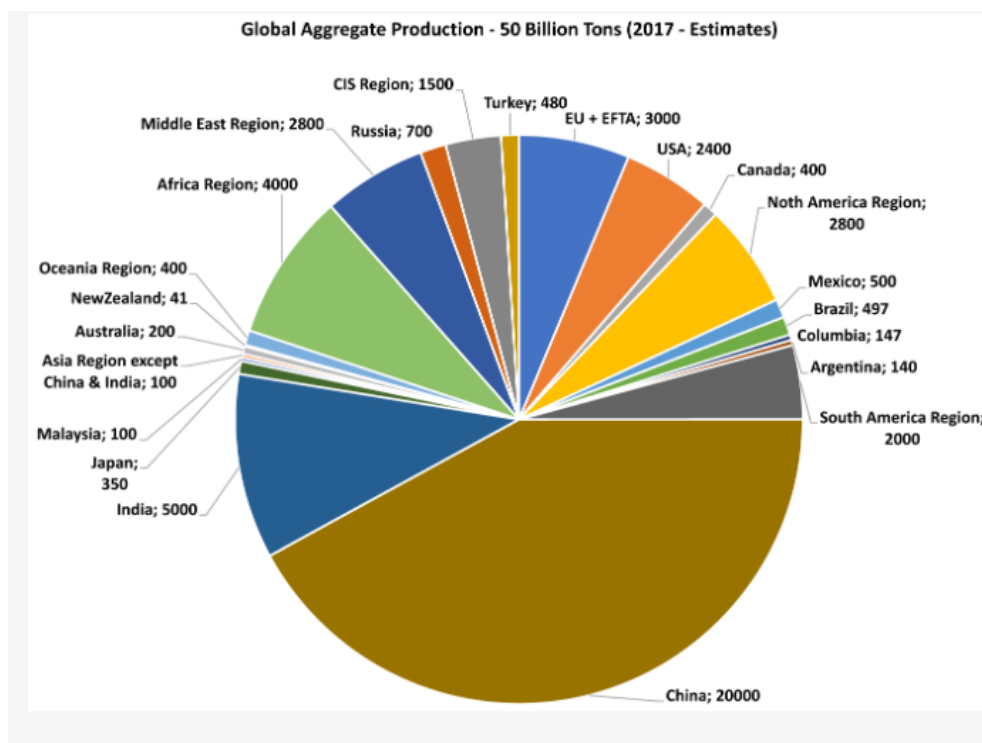


Figure III. 1: Production mondiale de granulats vierges (millions de tonnes).

Les GBRs, issus de la démolition de structures en béton, constituent une alternative durable aux granulats naturels. Leur utilisation permet de détourner les déchets de construction des sites d'enfouissement, de préserver les ressources naturelles et de réduire l'énergie consommée lors de l'extraction et du traitement des matériaux vierges [39]. En outre, l'intégration des GBRs dans le béton contribue à réduire l'empreinte carbone du secteur de la construction, en cohérence avec les objectifs globaux de développement durable [40].

Cependant, l'incorporation des GBRs soulève des préoccupations quant à leurs effets sur les propriétés mécaniques et la durabilité du béton. Leur nature hétérogène — en termes de taille, forme et qualité — complique la prédiction de leur comportement dans le béton [41]. Des éléments comme la teneur en mortier résiduel, la présence de contaminants ou de matériaux cimentaires résiduels peuvent également influencer sur la performance globale du béton [42].

L'usage des GBRs dans les éléments structurels suscite un intérêt croissant en raison de leurs bénéfices environnementaux et techniques. Stochino et al. (2024) [43] ont examiné des dalles composites acier-béton intégrant des GBRs, montrant qu'une teneur élevée en granulats recyclés diminue la résistance à la compression, sans compromettre l'intégrité structurelle. Leur étude suggère que les GBRs peuvent améliorer l'action composite avec les platelages en acier, renforçant leur potentiel pour une construction durable.

Comprendre l'influence des GBRs sur les propriétés mécaniques et la durabilité est essentiel pour optimiser les formulations et garantir la performance à long terme des ouvrages. Des recherches antérieures ont exploré divers aspects, tels que la résistance à la compression, à la traction et le module d'élasticité.

Malgré la croissance des travaux dans ce domaine, illustrée par la **Figure III.2**, la majorité des études se concentrent encore sur des propriétés spécifiques du béton à GBRs. Cette figure a été obtenue à partir d'une recherche par mot-clé dans la base de données Scopus (« granulats de béton recyclé »), portant sur les publications entre 2000 et 2025, afin de retracer l'évolution de la recherche au fil du temps.

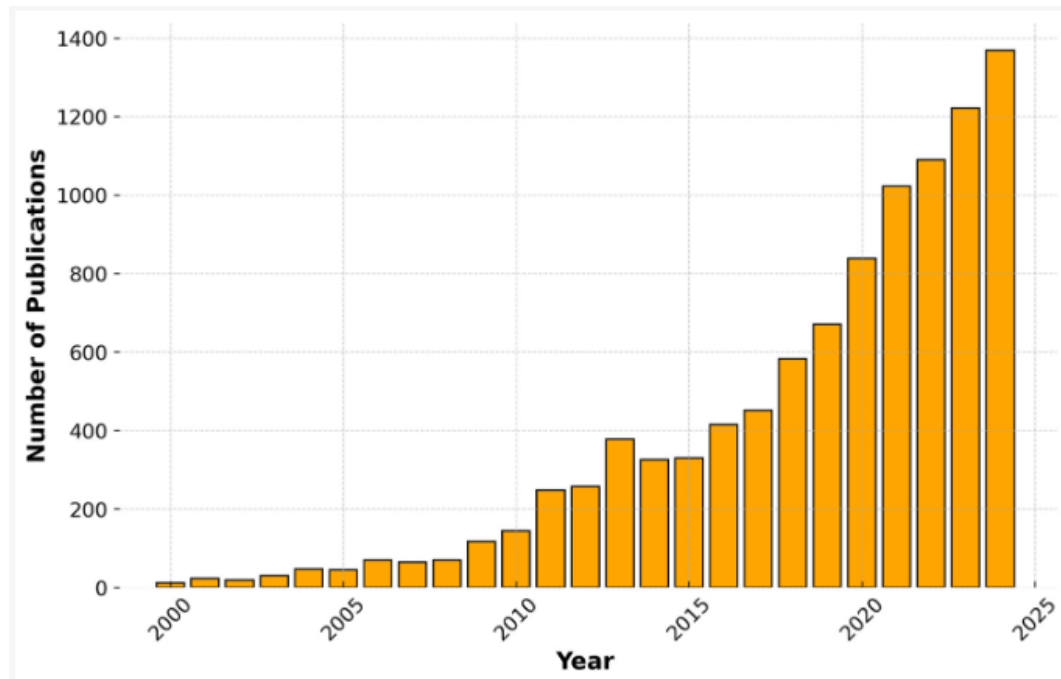


Figure III. 2: Tendence des publications de recherche sur les GBRs [44].

III.1 Évaluation des performances mécaniques des GBRs :

III.1.1 La distribution granulométrique (GBR) :

Les GBRs obtenus à partir de déchets de construction et de démolition sont produits par concassage et traitement de structures en béton démolies, ce qui donne des agrégats grossiers et fins qui peuvent être utilisés comme substituts des agrégats naturels dans les mélanges de béton. La **Figure III.3** et la **Figure III.4** donnent un exemple de GBR, illustrant leur taille et leur texture typiques des particules [45] .

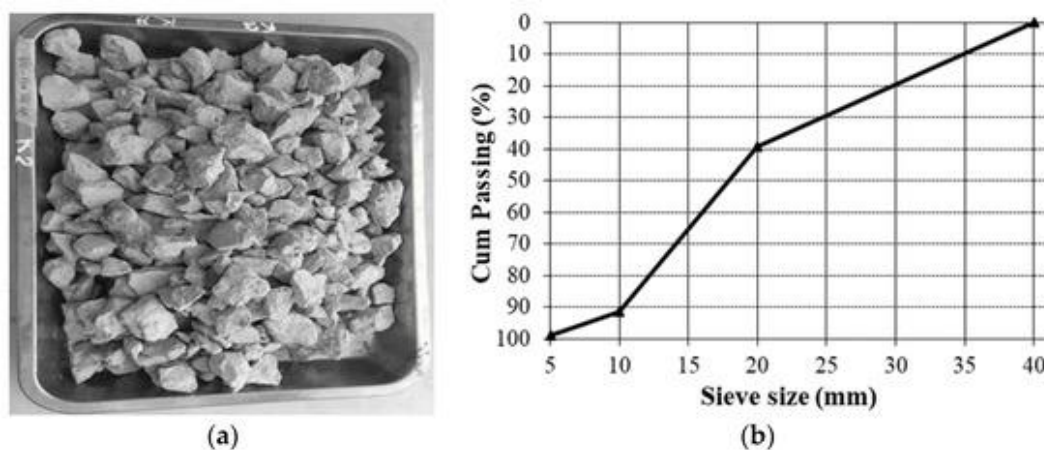


Figure III. 3: les granulats grossiers de béton recyclé (GBRs). b) la distribution granulométrique.

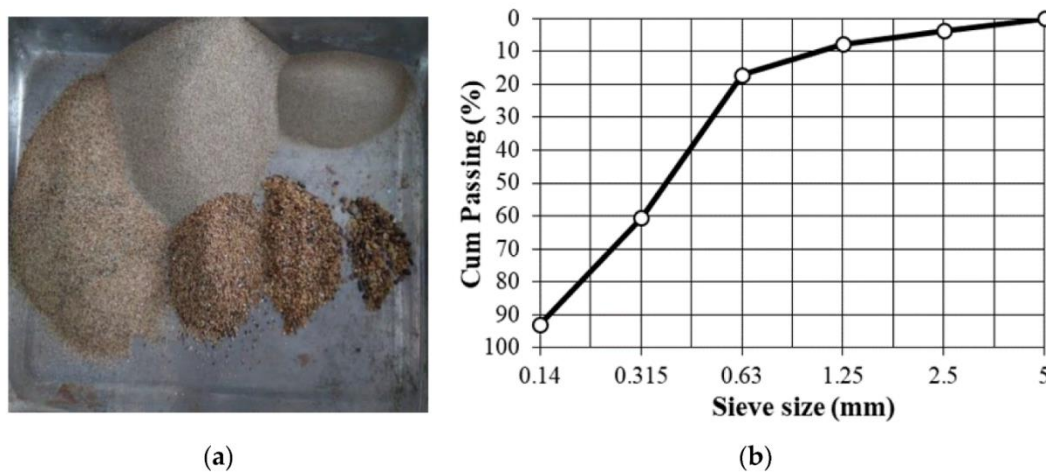


Figure III. 4: les granulats fins de béton recyclé (GBRs). b) la distribution granulométrique.

Les propriétés des GBR influencent fortement les performances des mélanges de béton. Leur qualité dépend de plusieurs facteurs, notamment celle du béton d'origine, le degré de contamination, le procédé de concassage et la distribution granulométrique [41]. La présence de mortier résiduel sur les particules peut affecter la maniabilité, la résistance et la durabilité du béton [40], d'où l'importance d'une caractérisation rigoureuse et d'un bon contrôle qualité. Des variations régionales influencent également les performances des GBRs, en raison de différences dans les caractéristiques des DCD. Par exemple, les démolitions anciennes contiennent souvent davantage de maçonnerie ou de plâtre, ce qui nuit à la résistance et à la durabilité, contrairement aux démolitions récentes plus riches en béton. Par ailleurs, les régions dotées de systèmes de recyclage avancés, comme certaines zones en Europe, produisent des GBRs de meilleure qualité [46].

Les recherches ont porté sur l'impact des GBRs sur la résistance mécanique, la durabilité, le retrait et la perméabilité du béton, ainsi que sur les taux optimaux de substitution des granulats naturels [47]. Des techniques comme le pré-trempe des GBRs ont été explorées pour améliorer leur compatibilité avec la pâte de ciment [48].

Le rôle du béton d'origine sur la qualité des GBR fait débat. Certains chercheurs affirment que ses propriétés influencent fortement la performance du béton recyclé, tandis que d'autres, comme Pani et al. (2020) [49], soulignent que les proportions du mélange et les conditions de cure ont un impact plus déterminant.

Enfin, les GBRs contribuent à réduire l'impact environnemental du béton, en diminuant l'utilisation des ressources naturelles, les émissions de gaz à effet de serre et les besoins en mise en décharge [50]. Leur intégration soutient les objectifs de développement durable, bien que des défis persistent concernant la variabilité des propriétés et la performance à long terme [51].

III.1.2 Propriétés mécaniques du béton avec des GBRs :

Résistance à la compression :

La résistance à la compression est l'un des critères essentiels pour évaluer les performances du béton. De nombreuses études, comme celle de Silva et al. (2014) [52], ont montré que l'effet des granulats recyclés sur cette résistance varie fortement selon plusieurs facteurs. Les différences de qualité entre granulats naturels de référence, les méthodes de comparaison (rapport eau/ciment constant, maniabilité équivalente, etc.) et les caractéristiques propres des granulats recyclés (forme, taille, porosité) compliquent l'obtention de conclusions uniformes. Une analyse statistique sur plusieurs publications révèle que la résistance du béton avec granulats recyclés diminue globalement avec l'augmentation de leur taux de substitution, bien que l'impact exact dépende du contexte expérimental.

Les résultats sont présentés à la **Figure III.5**, où la résistance à la compression du GBR est exprimée sous la forme d'un rapport par rapport à celle du béton conventionnel et tracée en fonction du pourcentage de GBR utilisés pour remplacer les agrégats naturels.

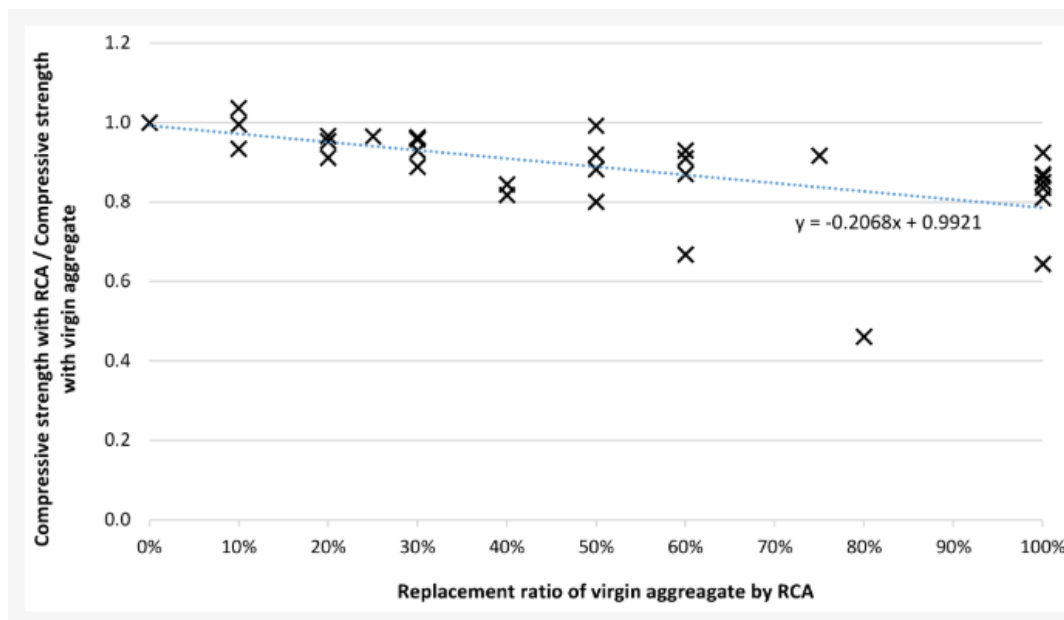


Figure III. 5: Résistance à la compression normalisée du béton avec GBR par rapport aux remplacements [53–60].

La résistance à la compression du béton tend à diminuer avec l'augmentation du taux de substitution par des granulats recyclés (GBRs), en raison de leur porosité, de la présence de mortier résiduel et de leur faible densité. Toutefois, pour des taux modérés (jusqu'à 30–40 %), la résistance peut rester proche de celle du béton conventionnel, à condition d'utiliser des GBRs de qualité. Au-delà de 50 %, la perte de performance devient plus marquée. Des traitements

comme le lavage ou le pré-trempe peuvent améliorer ces résultats. Enfin, une formulation adaptée du mélange et de bonnes conditions de cure permettent de compenser partiellement cette baisse, rendant possible une substitution partielle maîtrisée dans une optique de construction durable.

Résistance à la traction du béton avec GBR :

La résistance à la traction du béton diminue généralement avec l'introduction de granulats recyclés (GBRs), en raison d'une zone de transition interfaciale (ITZ) plus poreuse et fissurée que dans le béton classique (**Figure III.6**). Toutefois, cette baisse dépend fortement de la qualité et de l'origine des GBRs : ceux issus de bétons à haute performance impactent moins négativement la traction [61]. Des traitements comme le lavage ou le récurage améliorent leur propreté et, par conséquent, leur performance. Par ailleurs, l'ajout de matériaux cimentaires supplémentaires (MCS) tels que la fumée de silice ou les cendres volantes permet de renforcer l'ITZ et de réduire la porosité, améliorant ainsi la résistance à la traction. Une cure prolongée, en particulier lorsqu'elle est combinée à ces ajouts, peut permettre d'atteindre des performances proches de celles du béton conventionnel [62].

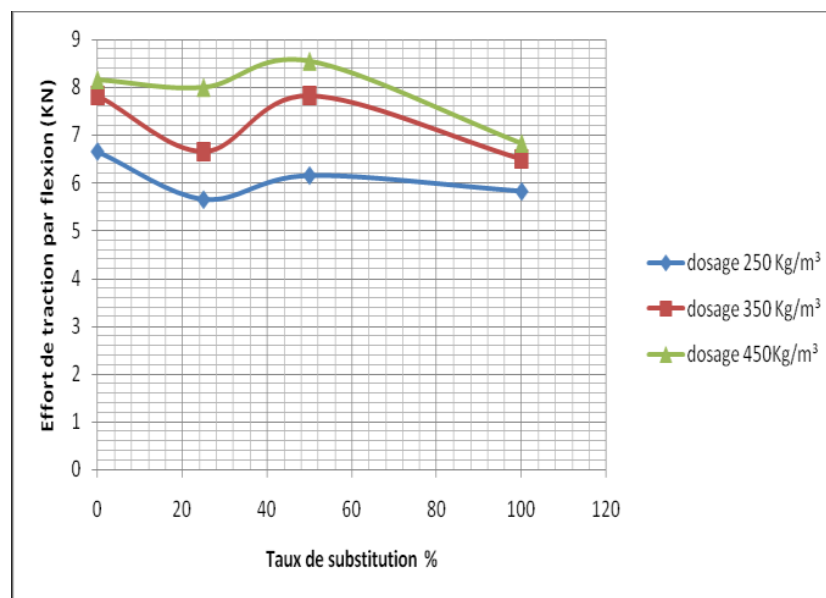


Figure III. 6: Variation de la résistance à la traction des bétons à 28J en fonction du taux de substitution [63] .

La **Figure III.7** confirme que la résistance à la traction est sensible à la qualité et à la proportion des granulats recyclés utilisés, avec un impact généralement plus marqué que sur la résistance à la compression. Une tendance décroissante de la résistance à la traction lorsque le taux de substitution augmente a été observée. Cela signifie que plus la proportion de granulats recyclés

est élevée, plus le béton devient vulnérable aux efforts de traction, en raison de la porosité accrue des granulats recyclés, de l'adhérence pâte-ciment moins efficace, et la présence de mortier résiduel sur les granulats, qui agit comme un point faible.

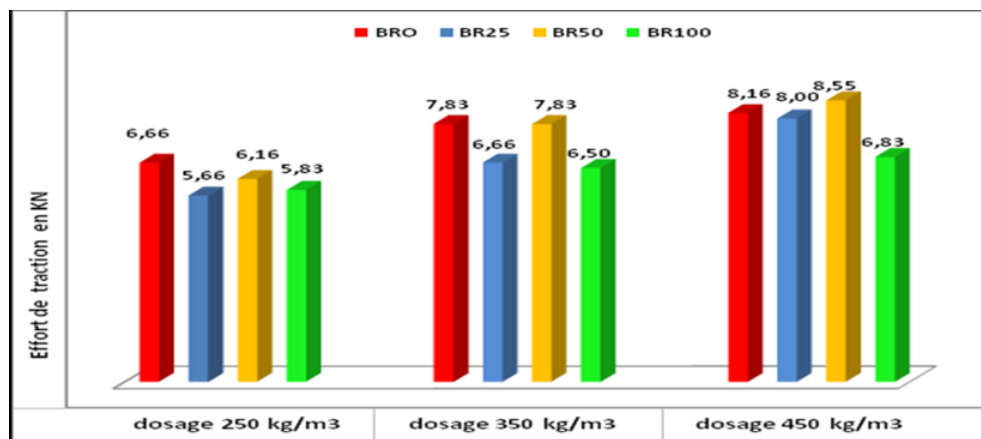


Figure III. 7: Influence du taux de substitution sur la résistance en Traction des bétons à base de granulats recyclés (béton de démolition) [63] .

Le module d'élasticité :

Le module d'élasticité du béton, reflet de sa rigidité, diminue généralement avec l'incorporation du GBR, en raison de leur porosité, du mortier résiduel et des microfissures qu'ils contiennent. Cette perte peut atteindre jusqu'à 30 % pour un béton entièrement composé de GBRs. Toutefois, plusieurs traitements des granulats permettent de limiter cette baisse : lavage à l'acide, récurage mécanique, imprégnation de polymères ou dépôt de biocalcium. Ces méthodes ont permis des améliorations significatives du module d'élasticité, allant de 12 % à plus de 40 % selon la technique utilisée [64].

Les données du **Tableau III.1** confirment une baisse significative du module d'élasticité avec l'augmentation du taux de GBR. Le béton de référence (M0-0) affiche 34,7 GPa, contre seulement 16,7 GPa pour le mélange intégralement composé de GBR (M100-100).

Tableau III. 1: Effet du remplacement du GBR sur le module d'élasticité du béton [65].

Mélange	Module d'élasticité moyen (GPa)	Coefficient de variation CoV (%)
M 0 à 0	34.7	13.43
M 30 à 30	22.5	0.53
M 50 à 50	23.7	1.45
M 100 à 100	16.7	0.03

Le **Tableau III.1** : confirme que le module d'élasticité chute de 34,7 GPa (béton 100 % granulats naturels) à 16,7 GPa pour le béton entièrement composé de GBR.

Effet du taux de remplacement 23,7 GPa à 50 %, représente une réduction de plus de 50 %, confirmant l'impact négatif des GBRs sur la rigidité du béton. La baisse est non linéaire : une forte chute initiale est suivie d'un léger redressement avant de retomber à un minimum à 100%. Le coefficient de variation (CoV) est très faible pour les mélanges contenant des GBRs, en particulier à 100 % (0,03 %), ce qui indique une grande reproductibilité des résultats, malgré les faibles valeurs. En revanche, le mélange de référence (M 0-0) présente une plus grande variabilité (13,43 %), peut-être liée à l'hétérogénéité des granulats naturels.

III.1.3 La capture du CO₂ dans les granulats recyclés (GBRs) :

L'intégration des GBRs dans la construction suscite un intérêt croissant en raison de leur potentiel de capture du CO₂ par carbonatation. Ce processus chimique, où le CO₂ réagit avec les composés calciques pour former des carbonates stables, se déroule principalement dans les zones poreuses des GBRs, augmentant ainsi leur capacité de séquestration. Des techniques comme la carbonatation accélérée améliorent l'efficacité de ce mécanisme.

Des études récentes (Braymand et al., 2024 [66]; Jiang et al., 2025 [67]) ont montré que les GBRs peuvent capter jusqu'à 20 % de CO₂ de plus que les granulats naturels dans des conditions similaires. Selon une analyse du cycle de vie (Ang et al., 2024 [68]), l'utilisation de GBR carbonatés peut réduire l'empreinte carbone du béton de 25 à 30 %. De plus, le processus améliore les propriétés mécaniques des GBRs, en densifiant la microstructure et réduisant la porosité.

Cependant, la carbonatation abaisse l'alcalinité, ce qui peut augmenter le risque de corrosion des armatures. Des méthodes innovantes, comme la capture intégrée à faible consommation d'énergie (Tham et al. 2024) [69] ou la séquestration aqueuse (Chong et al. 2024) [70], montrent un bon potentiel industriel. Néanmoins, l'efficacité de capture diminue avec le temps en raison de la saturation en carbonates.

Les recherches futures devront optimiser les conditions de carbonatation (température, humidité, pression) et intégrer cette méthode à d'autres pratiques durables, comme l'usage de substituts de ciment, afin de renforcer l'impact environnemental positif des GBRs.

III.1.4 Analyse du cycle de vie (ACV) dans les GBRs :

L'analyse du cycle de vie (ACV) est devenue essentielle pour évaluer les impacts environnementaux, économiques et de durabilité des GBRs. Elle permet d'optimiser leur

utilisation tout en réduisant leur empreinte carbone. Selon (Ang et al. 2024) [68], l'usage des GBRs dans le béton peut réduire les émissions de CO₂ de 30 à 40 %, et le béton géopolymère à base de GBR présente un potentiel de réchauffement global inférieur de 25 % (Huang & Wang, 2024) [71].

Les GBRs nécessitent également moins d'énergie pour leur traitement que les granulats naturels. Par exemple, le béton LC3 à base de GBR consomme 18 % d'énergie en moins (Huang et al., 2025) [72]. Sur le plan économique, leur rentabilité dépend des distances de transport et des coûts de traitement. Utilisés localement, les GBRs peuvent être jusqu'à 20 % plus économiques.

En associant les GBRs et matériaux cimentaires alternatifs (SCM), les émissions peuvent baisser de 40 à 50 % (Ma et al., 2025) [73]. De plus, de nouveaux outils comme les jumeaux numériques ou l'intelligence artificielle (IA) permettent de mieux prévoir les impacts environnementaux à long terme (Pradhan et al. 2024) [74].

Conclusion :

L'utilisation des GBRs issus des déchets de construction permet de réduire l'impact environnemental du béton en limitant les déchets, la consommation de ressources et les émissions de CO₂. Toutefois, leur qualité variable affecte la résistance et la durabilité du béton. Des traitements mécaniques, chimiques et l'ajout de matériaux cimentaires peuvent améliorer ces propriétés. Les GBRs présentent aussi un potentiel de capture du CO₂ par carbonatation. Les analyses du cycle de vie confirment leur avantage écologique et économique, surtout avec une production locale optimisée. Pour une adoption généralisée, des protocoles normalisés et des études sur la durabilité à long terme sont nécessaires.

III.2 Effet des cendres volantes, de la fumée de silice et des fibres de polypropylène sur les propriétés du béton recyclé GBRs :

De nombreuses recherches ont été menées pour améliorer la résistance et la durabilité du béton à base de granulats recyclés (GR) [24]. L'ajout de MCS (Matériaux Cimentaires Supplémentaires), tels que les cendres volantes (CV) et la fumée de silice (FS), renforce la microstructure de la zone de transition interfaciale (ITZ) et améliore les propriétés mécaniques du GBR [25,26]. Ces effets bénéfiques sont liés à la finesse des particules et à leur forte réactivité [13]. L'utilisation conjointe de GR, de CV et de fibres de polypropylène (PPF) permet d'améliorer la résistance à la flexion, la ductilité et la résistance à l'impact du béton [33,34].

Bien que des taux élevés de GR (au-delà de 25 %) entraînent une baisse notable de la résistance (jusqu'à 50 %) [35,36], l'ajout combiné de CV, FS et de fibres PPF permet de compenser cette perte et d'obtenir des performances comparables à celles du béton traditionnel [31,32]. Cette approche, encore peu explorée pour des teneurs élevées en GR, représente une avancée importante dans la production de bétons plus durables [40].

III.2.1 Comportement des bétons à base de cendres volantes, fibre de polypropylène et granulats recyclés (GBRs) :

Cendres volantes :

Les cendres volantes (CVs), un sous-produit de la combustion du charbon dans les centrales thermiques, peuvent être considérées comme appartenant à la **classe F** selon les critères définis par la norme **ASTM C618**. Cette norme américaine établit les spécifications des cendres volantes utilisées comme ajouts cimentaires dans le béton.

La **classe F** désigne des cendres volantes issues de la combustion de charbons bitumineux ou anthracite, pauvres en chaux (**CaO**) (généralement < 10 %). Elles ont principalement une action pouzzolanique, réagissant avec l'hydroxyde de calcium pour former des produits cimentaires.

Fibre de polypropylène :

Les fibres de polypropylène (PPF) utilisées dans cette application avaient des dimensions spécifiques :

- Une longueur de 12 mm,
- Un diamètre de 0,55 mm.

Cela signifie que les fibres synthétiques ajoutées, étaient relativement fines et courtes. Ces dimensions influencent leur comportement dans le mélange, notamment en termes de dispersion, adhérence, et résistance à la fissuration.

Granulats :

- Granulats grossiers :

Les granulats GN et GR sont illustrés dans la **Figure III.8**. La **Figure III.9** présente l'analyse granulométrique des agrégats grossiers, tandis que le **Tableau III.2** présente les caractéristiques physiques des GBRs grossiers qui sont dérivés des déchets générés par l'industrie du béton préfabriqué.



Figure III. 8: Les granulats GN et GR.

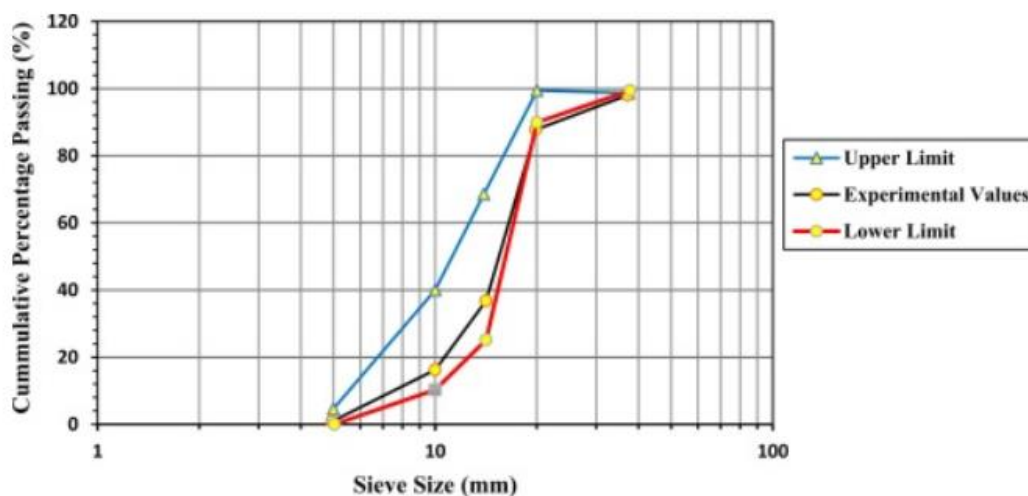


Figure III. 9: Analyse granulométrique des agrégats grossiers.

Tableau III. 2: Caractéristiques physiques des agrégats grossiers et des agrégats fins.

Propriétés	Agréat		GBR
	Grossier	Fin	
Module de finesse		2.51	
Taille des particules (mm)	25–4.75	4.75–0.075	25–4.75
Absorption (%)	2.18	2.16	4.2

- Granulats fins :

L'agrégat fin utilisé dans l'étude précédente a été obtenu dans la région de Lawrenceburg. L'agrégat fin a fait l'objet d'une analyse par tamis selon la norme ASTM C136.

La Figure III.10 montre la distribution granulométrique. Le Tableau III.3 présente les caractéristiques physiques de la fibre de polypropylène, couramment utilisée comme renfort dans les matériaux composites. Avec un diamètre de 0,02 mm et une longueur de 12 mm, cette fibre présente une très bonne flexibilité et une grande surface de contact avec la matrice. Son module de Young de 3,2 GPa et sa résistance à la traction de 420 MPa indiquent une rigidité et une résistance mécaniques appréciables pour un polymère. Sa densité relativement faible (0,92 g/cm³) en fait un matériau léger, adapté aux applications où la réduction de poids est cruciale. Enfin, sa capacité à se déformer jusqu'à 21 % avant rupture montre une bonne ductilité, ce qui contribue à améliorer la ténacité des composites dans lesquels elle est incorporée.

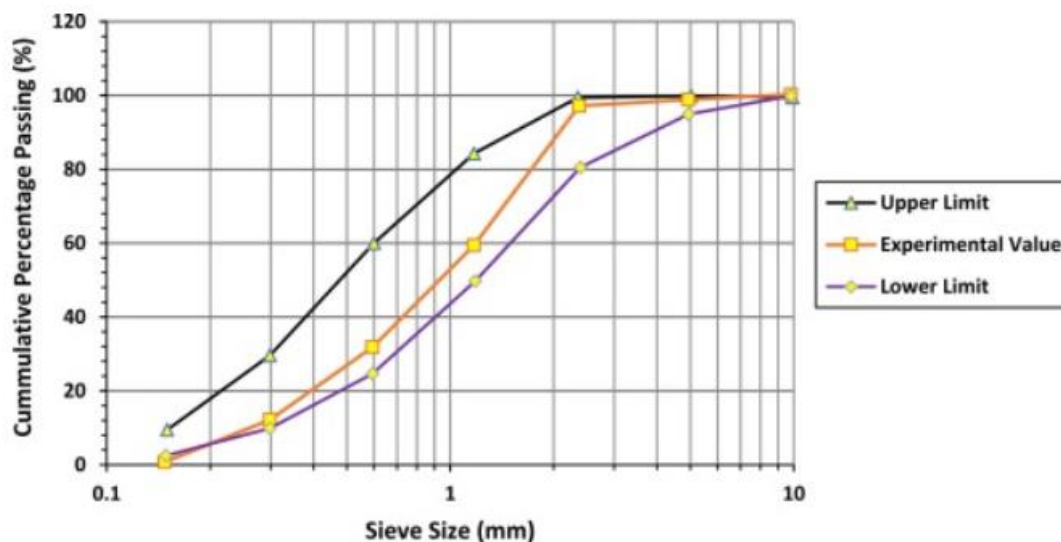


Figure III. 10: Analyse granulométrique des agrégats fins.

Tableau III. 3: Caractéristiques physiques de la fibre de polypropylène.

Propriétés	Valeurs
Diamètre (mm)	0.02
Longueur (mm)	12
Module de Young	3.2 GPa
Traction	420 MPa
Densité	0,92 (g/cm ³)
Déformation de défaillance	21%

III.2.2 Propriété mécanique :

Résistance à la compression :

Le mélange Mix-1 est constitué uniquement de granulats naturels, tandis que Mix-2, Mix-3 et Mix-4 intègrent respectivement 50 %, 75 % et 100 % de GR. Chaque mélange est subdivisé selon différents taux de fibres de polypropylène (FPP : 10 %, 20 %, 30 %) en quatre sous-groupes (R0F20P0 à R0F20P30). Au total, 576 échantillons ont été testés pour évaluer leurs propriétés mécaniques et de durabilité. Conformément aux études antérieures, une augmentation du taux de GR entraîne une baisse progressive de la résistance à la compression [31,41], malgré l'ajout constant de fumée de silice (21,75 kg/m³) et de cendres volantes (87 kg/m³).

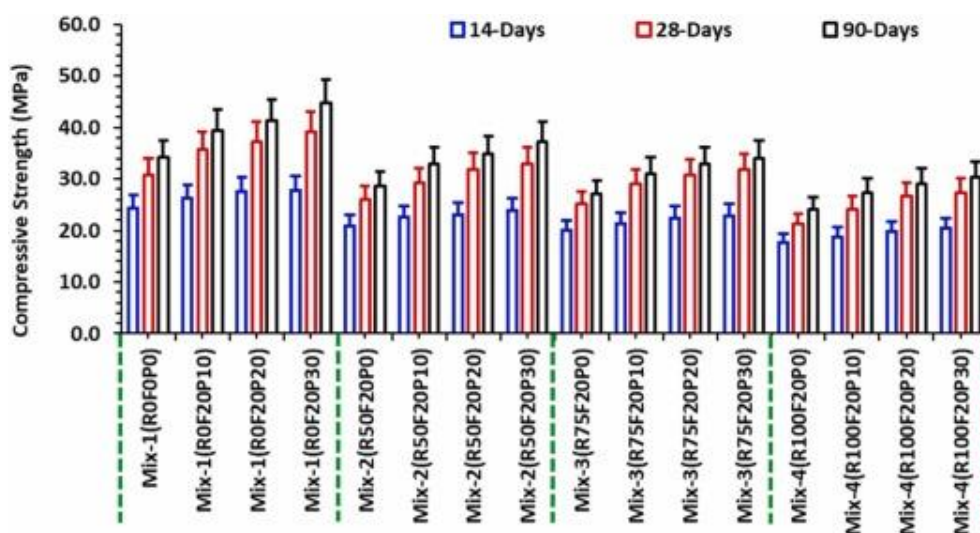


Figure III. 11: La résistance à la compression.

Les résultats montrent une amélioration progressive de la résistance à la compression avec le temps de cure, atteignant un maximum à 90 jours. Le béton de référence (Mix-1), sans granulats recyclés mais avec 20 % de cendres volantes et 30 % de fibres PP, atteint 44,8 MPa, contre 34,1 MPa sans ajouts. L'introduction de granulats recyclés (50 %, 75 %, 100 %) réduit la résistance, mais l'ajout de fibres compense partiellement cette baisse. Par exemple, dans Mix-2, la résistance passe de 28,6 à 37,3 MPa avec fibres ; dans Mix-3, de 27,1 à 34 MPa ; et dans Mix-4, de 24,1 à 29,1 MPa. Ainsi, bien que les granulats recyclés diminuent la résistance à cause de leur porosité, leur combinaison avec CV et fibres améliore les performances à long terme.

Résistance à la traction :

La **Figure III. 12** montre que La résistance en traction augmente avec le temps de cure, bien que moins nettement qu'en compression. Le béton témoin (sans ajouts) atteint 3,2 MPa à 90 jours, contre 4,1 MPa avec l'ajout de 20 % de cendres volantes et 30 % de fibres PP. L'introduction de granulats recyclés diminue la résistance initiale, mais l'ajout de fibres améliore significativement les performances : à 90 jours, Mix-2 (50 % RA) passe de 2,6 à 3,6 MPa, Mix-3 de 2,5 à 3,3 MPa, et Mix-4 de 2,4 à 3,0 MPa. L'effet combiné des CV et des fibres améliore la densité de la matrice (observée en MEB) et limite la propagation des fissures, renforçant ainsi la traction, même à taux élevé de recyclage [42].

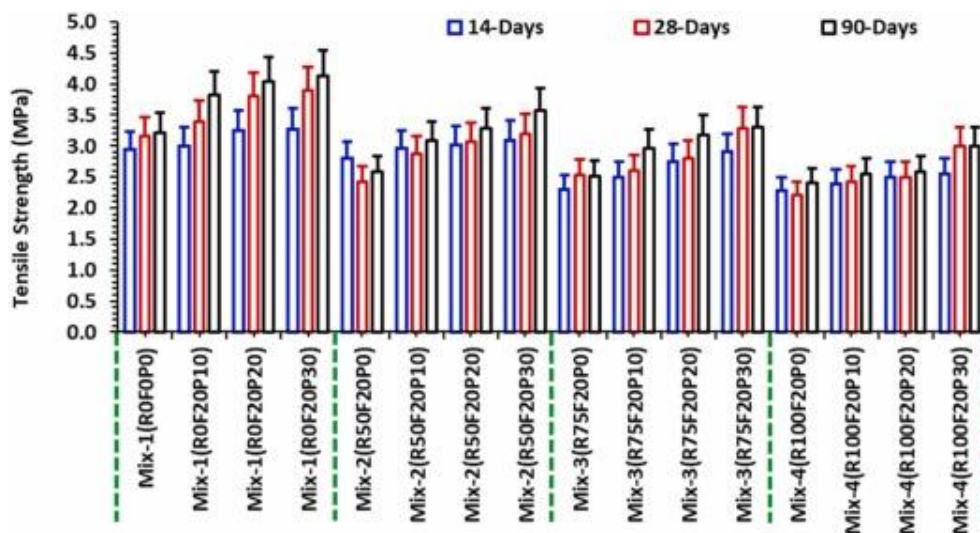


Figure III. 12: Évaluation de la résistance à la traction.

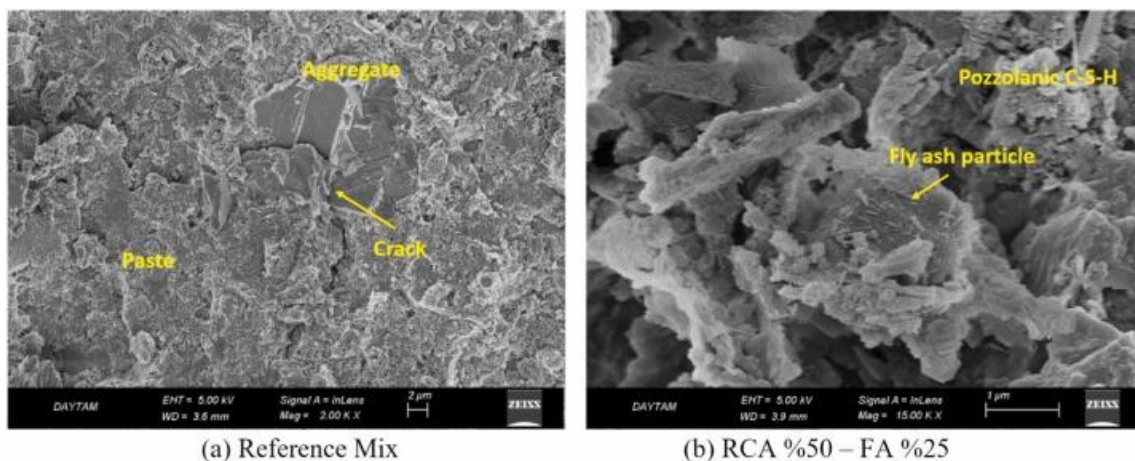


Figure III. 13: Microstructure du béton à base de fibres GB et CV.

III.2.3 Propriété physique :

Densité :

La **Figure III. 14** montre que la densité diminue avec l'augmentation du taux de granulats recyclés (GR), en raison de leur plus faible masse volumique et de la perte d'eau au séchage. À l'inverse, l'ajout de fibres de polypropylène (jusqu'à 30 %) et de fumée de silice augmente la densité du béton, grâce à l'effet de remplissage et à la densité propre de ces matériaux. Par exemple, la densité passe de 2367 kg/m³ (Mix-1, 0 % GR) à 2177 kg/m³ (Mix-4, 100 % GR) sans fibres.

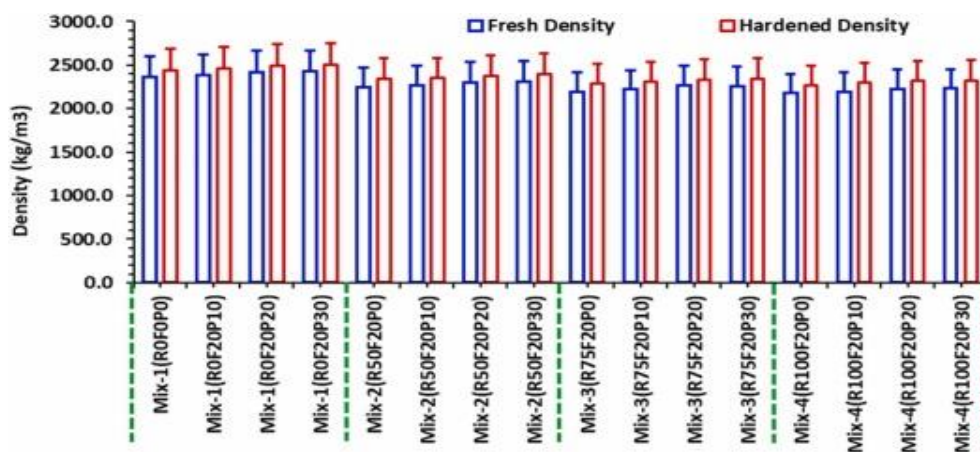


Figure III. 15: Résultats de densité de tous les mélanges.

Absorption d'eau :

L'absorption d'eau renseigne sur la porosité et la compacité du béton. Les GBRs, plus poreux que les granulats naturels, entraînent une absorption plus élevée. Les résultats (**Figure III.15**) montrent une diminution générale de l'absorption entre 14 et 90 jours grâce à l'hydratation continue. Toutefois, plus le taux de GBR est élevé, plus l'absorption reste importante, comme observé pour Mix-4 (100 % GBR), en raison de la porosité et du mortier résiduel des GBRs.

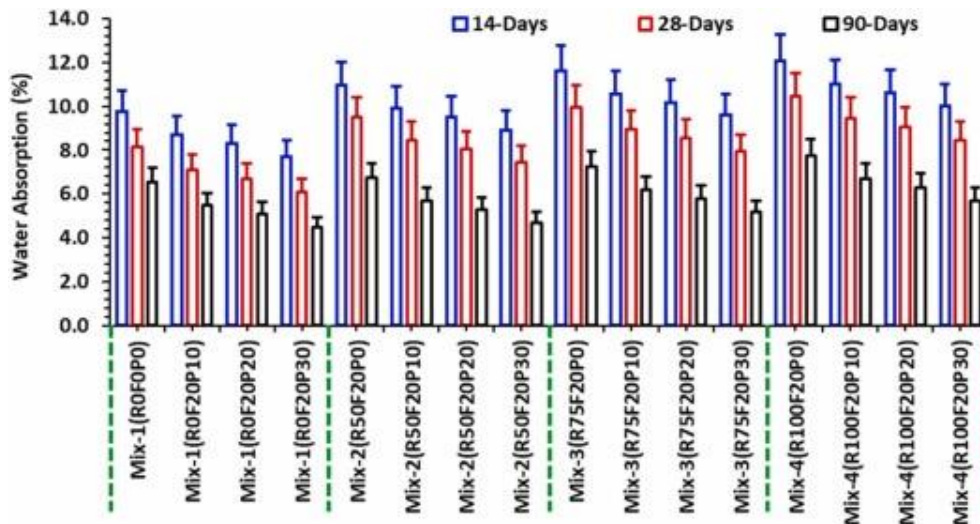


Figure III. 16: Résultats de l'absorption d'eau.

Conclusion :

L'étude montre une diminution de la résistance à la compression lorsque le pourcentage de GBR augmente (50 %, 75 %, 100 %). Toutefois, l'ajout de cendres volantes (25 kg/m³) combiné à des FPP à 10 %, 20 %, et 30 % entraîne une augmentation de la résistance à 28 jours de 15 %, 20 %, et 27 % respectivement, montrant un effet bénéfique de ces ajouts. L'incorporation de GBR à 50 %, 75 % et 100 % entraîne une diminution progressive de la résistance à la traction. Il est recommandé, dans un cadre structurel, de limiter la substitution à 50 % de GBR, en maintenant les cendres volantes constantes et 30 % de PPF, car cela permet un compromis entre durabilité et performance mécanique. À 100 % de GBR, une baisse de 10 % de la résistance par rapport au béton témoin est observée, même en présence des additifs.

The page is framed by a double-line blue border. Inside, there is a central rectangular frame with decorative, rounded corners and a slight drop shadow. The text is centered within this inner frame.

CHAPITRE IV
*Evaluation des
performances des
matériaux recyclés*

Introduction :

L'évaluation des performances des matériaux recyclés vise à garantir qu'ils répondent aux exigences techniques, environnementales et de durabilité comparable aux matériaux traditionnels. Sur le plan mécanique, on vérifie leur résistance à la compression, à la traction ou à la flexion afin d'assurer leur capacité structurelle. Les propriétés physiques comme la densité, la porosité et l'absorption d'eau sont mesurées pour évaluer leur comportement en œuvre. L'analyse chimique permet de détecter la présence de contaminants (chlorures, sulfates, métaux lourds) pouvant nuire à la durabilité ou à la compatibilité avec d'autres matériaux. La durabilité est testée à travers des cycles de gel/dégel, la résistance à la carbonatation ou aux agents agressifs pour estimer la longévité en conditions réelles. L'impact environnemental est évalué par l'analyse du cycle de vie (ACV), tenant compte des émissions de CO₂, de l'énergie grise et de la recyclabilité. Enfin, la compatibilité avec les liants ou matériaux neufs est essentielle pour garantir une bonne adhérence et une intégration efficace dans des applications de construction ou de réhabilitation. Ces évaluations permettent de valider l'utilisation responsable et fiable des matériaux recyclés dans le cadre d'une économie circulaire comme indique sur le **Tableau IV.1**.

Tableau IV. 1: principales dimensions d'évaluation.

Type de performance	Méthodes d'évaluation	Critères courants
Mécanique	Essais de compression, traction, flexion, cisaillement	Résistance à la compression (MPa), module d'élasticité, etc.
Physique	Analyse granulométrique, densité, absorption d'eau, porosité	Masse volumique, taux d'absorption, taille des particules
Chimique	Spectrométrie, pH, analyse des sels ou contaminants	Présence de chlorures, sulfates, substances nocives
Durabilité	Essais au gel/dégel, carbonatation, perméabilité, résistance chimique	Vitesse de carbonatation, indice de porosité, perte de masse
Environnementale	Analyse du cycle de vie (ACV), tests de lixiviation, émissions de CO ₂	Potentiel de réchauffement global, toxicité, recyclabilité
Compatibilité	Test d'adhérence avec liants, compatibilité avec matériaux neufs	Cohésion avec béton neuf, réactivité chimique

IV.1 Analyse du cycle de vie appliquées aux matériaux recyclés :

L'analyse du cycle de vie appliquée aux matériaux recyclés dans le génie civil et l'architecture contemporaine met en lumière les stratégies de durabilité adoptées à chaque phase, de la production à la fin de vie (**Tableau IV.2**). Le métal, tel que l'acier ou l'aluminium recyclé, contribue à réduire l'exploitation minière et les émissions, tout en étant entièrement recyclable sans perte de qualité. Le bois récupéré permet la conservation des forêts et la séquestration du carbone, avec des possibilités de réutilisation variées et une fin de vie biodégradable. Le verre, issu du recyclage de déchets industriels ou domestiques, peut être fondu indéfiniment, conservant ses propriétés thermiques et énergétiques. Le béton intègre des composants recyclés comme les cendres volantes ou les scories, réduisant les émissions de CO₂, mais son recyclage reste énergivore s'il n'est pas bien géré. Les plastiques, bien qu'utiles pour alléger les structures et améliorer l'isolation, posent un problème environnemental majeur en fin de vie du fait de leur non-biodégradabilité. Enfin, les matériaux de maçonnerie, comme les briques, favorisent une économie circulaire en étant aisément réutilisés ou broyés pour de nouveaux usages. Ce panorama met en évidence l'importance de concevoir des matériaux à la fois durables, adaptables et valorisables en fin de vie pour réduire l'empreinte écologique du secteur de la construction.

Tableau IV. 2 : Phases d'ACV pour les matériaux recyclés et dans le génie civil et l'architecture contemporaine.

Matériel	Objectif de durabilité	Matériaux et production	Construction	Phase d'utilisation	Phase de recyclage	Phase d'upcycling	Phase de fin de vie
Métal	Réduire l'exploitation minière, économiser de l'énergie et réduire les émissions	Acier et aluminium recyclés à partir de ferraille et de déchets industriels	Intégration facile dans des cadres structurels	Haute durabilité, résistance à la corrosion et économies d'énergie	Fondu et reformé pour produire de nouveaux produits métalliques	Réutiliser les poutres en acier dans de nouveaux projets	Entièrement recyclable à haute température sans perte de qualité
Bois	Promouvoir la conservation des forêts et la séquestration du carbone	Bois récupéré de vieux bâtiments et de débris de construction	Utilisé dans les charpentes de bâtiments, les revêtements et les revêtements de sol	Longue durée de vie s'il est correctement traité, renouvelable et de conception biophilique	Déchiqueté pour les panneaux de fibres, le paillis ou le biocarburant	Réutilisé en meubles et en petites structures en bois	Décomposition naturelle en cas de non-traitement ou d'incinération
Verre	Réduire l'extraction de sable, minimiser la consommation d'énergie et les émissions	Verre recyclé à partir de bouteilles, de fenêtres et de déchets industriels	Incorporé dans les fenêtres, les façades et les éléments décoratifs	Propriétés d'isolation élevées et bâtiments économes en énergie	Broyé en calcin et fondu pour produire de nouveaux produits en verre	Recyclé en carreaux de verre décoratifs et mosaïques	Recyclage à l'infini sans perte de qualité
Béton	Réduire les émissions de CO ₂ émissions et utilisation de granulats vierges	Granulats recyclés, cendres volantes, scories et fumées de silice	Fondations, trottoirs et éléments préfabriqués	Haute résistance à la compression et durabilité et faible entretien	Broyage en granulats recyclés pour produire du nouveau béton	Morceaux de béton réutilisés dans l'aménagement paysager et les barrières	Mise en décharge, s'ils ne sont pas correctement recyclés, et énergie grise élevée
Plastique	Réduire les déchets mis en décharge et la consommation de pétrole	Plastique recyclé à partir de bouteilles, d'emballages et de déchets industriels	Utilisé dans la tuyauterie, l'isolation et les matériaux de construction légers	Résistance aux UV, utilisation flexible et légèreté	Fondu et remoulé en nouveaux produits en plastique	Transformés en matériaux de construction innovants (ex. : éco-briques)	Non biodégradables, mis en décharge ou incinérés

IV.2 Comparaison environnementale et économique des agrégats naturels et recyclés à l'aide de l'ACV :

L'étude d'Adriana Dias et al. (2022) [75], analyse les impacts environnementaux et économiques liés à l'utilisation des granulats recyclés (GR) en comparaison avec les granulats naturels (GN), en s'appuyant sur la méthode de l'analyse du cycle de vie (ACV). En comparant différentes sources de données (producteurs, bases génériques, de déclarations environnementales de produits (DEP), les auteurs montrent que les GRs, en particulier les granulats grossiers recyclés, présentent des impacts environnementaux nettement plus faibles, notamment lorsque les distances de transport sont réduites. À l'inverse, les GNs broyés, surtout les granulats grossiers concassés, génèrent les impacts les plus élevés. Sur le plan économique, les GR sont globalement plus avantageux, bien que les coûts de transport puissent influencer cette tendance. Cette étude confirme donc que l'utilisation des matériaux recyclés issus de la démolition, notamment sous forme de granulats, contribue à une réduction des impacts environnementaux et à une économie circulaire, à condition de maîtriser les paramètres logistiques.

IV.2.1 Évaluation environnementale et économique :

Les GRs constituent une solution durable aux GNs, permettant de limiter l'exploitation des ressources naturelles et de promouvoir l'économie circulaire. Leur production, qu'il s'agisse de granulats fins ou grossiers, roulés ou broyés, a fait l'objet d'analyses environnementales et économiques basées sur des données issues de producteurs, de bases de données génériques et de déclarations environnementales de produits (DEP).

IV.2.1.1 Evaluation de l'impact économique :

L'évaluation économique des granulats naturels (GN) et recyclés (GR) repose souvent sur des analyses coûts-avantages plutôt que sur une approche complète du coût du cycle de vie. Les études montrent que la production de GN implique des coûts environnementaux et de transport élevés (environ 42 %), tandis que pour les GR, ces coûts ne représentent que 21 %, les coûts les plus importants étant liés à la transformation et aux granulats finis. De manière générale, les GR sont moins coûteux que les GN, bien que cela varie selon les régions et les frais de transport, qui peuvent significativement influencer le coût total.

L'analyse économique couvre les coûts des différentes étapes de production, incluant l'équipement, la main-d'œuvre, le carburant, l'eau, l'entretien et les coûts fixes [76,77]. Selon Ohemeng et Ekolu [77], les coûts de production des agrégats naturels (NA) se répartissent

comme suit : 42 % pour l'environnement et le transport, 26 % pour le traitement, et 32 % pour les produits finis. Pour les agrégats recyclés (AR), ces proportions sont respectivement de 21 %, 36 %, et 43 %. La **Figure IV.1** illustre les coûts unitaires d'agrégats selon diverses sources (Portugal [78], Serbie [79], Australie[76], Afrique du Sud [77]). En général, les AR sont moins coûteux, sauf dans l'étude de Tošić et al. [79]. Le transport reste un facteur déterminant dans le coût total des agrégats.

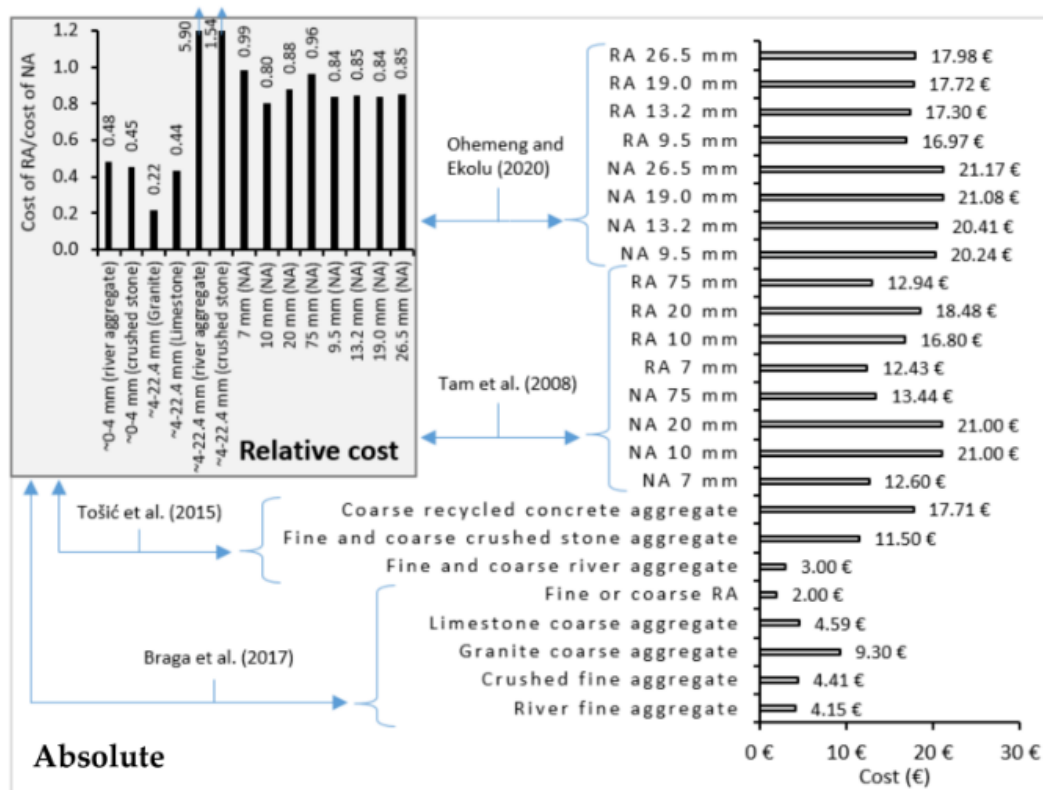


Figure IV. 1 : Coûts absolus et relatifs des différents types de granulats (coût de production des matières premières, par tonne).

IV.2.1.2 L'évaluation de l'impact environnemental :

L'évaluation de l'impact environnemental des granulats naturels (GN) et recyclés (GR) s'est basée uniquement sur des études disposant de données spécifiques issues de sites de production. Le **Tableau IV.3** synthétise les impacts environnementaux, exprimés en termes de potentiel de réchauffement global (PRG) et de consommation d'énergie primaire non renouvelable (PE-NRe), pour différents types de granulats classés selon leur taille (fins ou grossiers), leur nature (naturels ou recyclés) et leur mode de traitement (laminés ou broyés). Des granulats naturels (GN) et recyclés (GR) s'est basée uniquement sur des études disposant de données spécifiques issues de sites de production.

Chapitre IV : Evaluation des performances environnementales des matériaux recyclés 2025

Tableau IV.3: Type de granulats utilisés dans le béton et impacts environnementaux correspondants, d'après la littérature (GWP, en kg de CO₂ Eq ; PE-NRe, dans MJ).

Auteur	Grossier/Fin	Naturel/ Recyclé	Écrasé/ Roulé	Origine	GWP (kg CO ₂ QE)	PE-NRe (MJ)
Braga et al.[78]	Grossier	Naturel	Écrasé	Granit	24.4	344
Braga et al. [78]	Grossier	Naturel	Écrasé	Calcaire	31.4	441
Estanqueiro et al. [80]	Grossier	Naturel	Écrasé	Calcaire	15.4	240
Fraj et Idir [81]	Grossier	Naturel	Écrasé	Calcaire	4.39	320
Tošić et al. [79]	Grossier	Naturel	Écrasé	Calcaire	2.12	21.9
Hossain et al. [82]	Grossier	Naturel	Écrasé	Calcaire	32.0	496
Marinković et al. [83]	Grossier	Naturel	Roulé	Indéfini	1.39	14.8
Tošić et al. [79]	Grossier	Naturel	Roulé	Indéfini	1.34	11.2
Park et al. [84]	Grossier	Naturel	Roulé	Indéfini	14.3	-
Estanqueiro et al. [80]	Grossier	Recyclé	Écrasé	Béton	24,4 a	444 A
Estanqueiro et al. [80]	Grossier	Recyclé	Écrasé	Béton	20,5 milliards	381 b
Braga et al. [78]	Grossier	Recyclé	Écrasé	Béton	7.44	108
Marinković et al. [83]	Grossier	Recyclé	Écrasé	Béton	1.64	17.0
Fraj et Idir. [81]	Grossier	Recyclé	Écrasé	Béton	5.87	320
Hossain et al. [82]	Grossier	Recyclé	Écrasé	Béton	11.0	211
Park et al. [84]	Grossier	Recyclé	Écrasé	Béton	29,4 ch	-
Park et al. [84]	Grossier	Recyclé	Écrasé	Béton	38,1 j	-
Tošić et al. [79]	Grossier	Recyclé	Écrasé	Béton	7,02 e	79,7 e
Tošić et al. [79]	Grossier	Recyclé	Écrasé	Béton	5.19 f	60,8 f
Fraj et Idir. [81]	Bien	Naturel	Roulé	Calcaire	4.39	320
Tošić et al. [79]	Bien	Naturel	Roulé	Calcaire	2.12	21.9
Braga et al. [78]	Bien	Naturel	Roulé	Indéfini	9.87	135
Hossain et al. [82]	Bien	Naturel	Roulé	Indéfini	23.0	341
Tošić et al. [79]	Bien	Naturel	Roulé	Indéfini	1.43	11.2
Braga et al.[78]	Bien	Naturel	Écrasé	Indéfini	2.79	392
Hossain et al. [82]	Bien	Naturel	Écrasé	Indéfini	33.0	518
Tošić et al. [79]	Bien	Naturel	Écrasé	Indéfini	2.12	21.9
Hossain et al. [82]	Bien	Recyclé	Écrasé	Béton	12.0	235

Les impacts environnementaux des granulats ont été comparés à partir de trois sources de données (littérature, DEP et bases génériques), à l'aide de graphiques de dispersion croisant le potentiel de réchauffement planétaire (PRP) et la consommation d'énergie pour 1 tonne de matériau. Trois valeurs anormales ont été relevées, attribuées à des méthodes de broyage spécifiques ou aux contextes nationaux (Braga et al. [78], Fraj et Idir [81]). Les meilleurs résultats environnementaux concernent les granulats laminés naturels (fins et grossiers) produits en Serbie, tandis que les plus mauvais sont associés aux granulats concassés chinois, fortement impactés par les longues distances de transport (**Figure IV.2**).

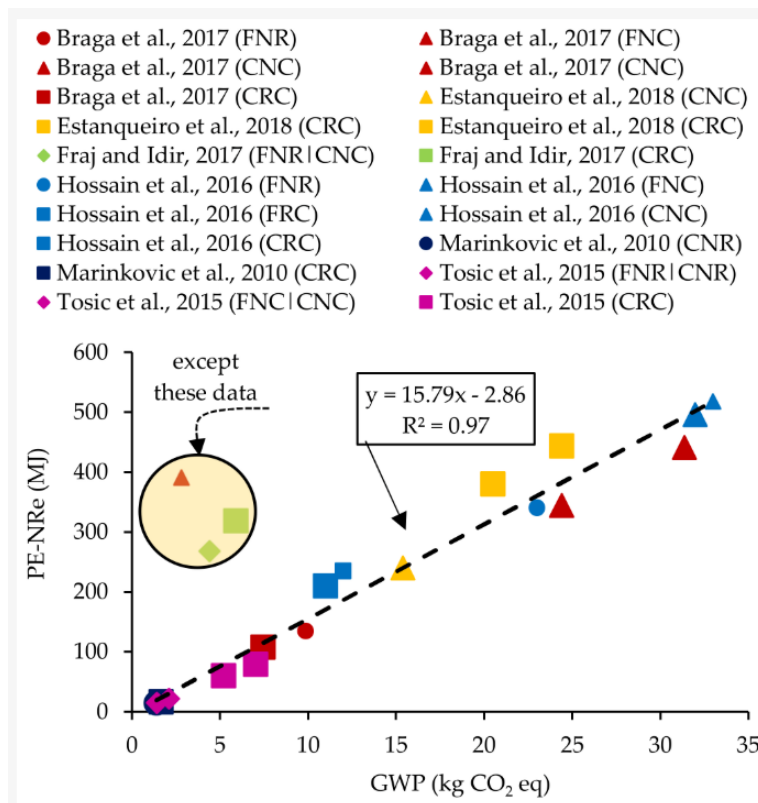


Figure IV. 2: PRP (kg de CO₂ eq) par rapport au PE-NRe (MJ) résultats de l'examen de la littérature, par tonne de granulat.

Selon les données issues des déclarations environnementales de produits (DEP) sélectionnées [85,86], une corrélation claire entre le potentiel de réchauffement global (GWP) et la consommation d'énergie primaire non renouvelable (ADPF) a été établie (**Figure IV.3**). Deux DEP ont été exclues, car leurs résultats étaient incohérents par rapport aux autres. Les meilleures performances environnementales ont été observées pour les granulats recyclés grossiers, tandis que les plus mauvais résultats concernaient les granulats naturels grossiers broyés.

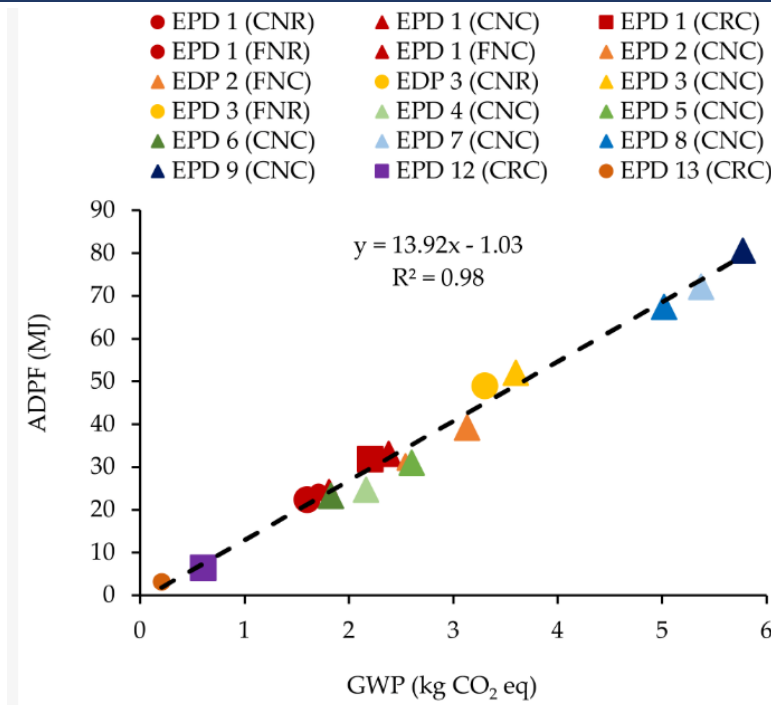


Figure IV. 3: PRP (kg de CO₂ eq) par rapport à l'ADPF (MJ) résultats de l'EPD, par tonne de granulat.

IV.3 Écologie et Durabilité Environnementale :

L'utilisation de matériaux recyclés dans le béton est une pratique qui contribue à la réduction des déchets de construction et à la conservation des ressources naturelles.

Réduction des déchets : L'utilisation de matériaux recyclés dans la fabrication de béton permet de réduire la quantité de déchets envoyés en décharge, en particulier pour les matériaux comme les pneus usagés (caoutchouc), le verre et la céramique.

Réduction de l'empreinte carbone : Le remplacement des granulats naturels par des matériaux recyclés permet de réduire la demande en ressources naturelles, et par conséquent, l'empreinte carbone associée à l'extraction, au transport et à la transformation de ces ressources.

Réduction des coûts : En réutilisant des déchets comme matériaux dans le béton, les coûts associés à l'achat de granulats naturels et au traitement des déchets sont réduits.

IV.4 Facteurs influençant la performance :

- Qualité du béton démolé : béton haute performance recyclé → meilleures propriétés.
- Propreté des granulats recyclés : lavage, tri, élimination des impuretés → performance améliorée.
- Présence de mortier résiduel : augmente la porosité, diminue la densité et la résistance.

- Traitements : pré-saturation, enrobage, imprégnation de silicates ou polymères.
- Ajouts cimentaires : cendres volantes, fumée de silice, laitiers → améliorent ITZ et durabilité.
- À 30 % de GBR, les propriétés mécaniques restent proches du béton conventionnel.
- À 50 %, il faut combiner avec des ajouts cimentaires ou des fibres pour maintenir la performance.
- À 100 %, les pertes de performance sont notables, mais peuvent être partiellement compensées par traitements et formulations optimisées.
- Un béton avec 50 % de GBR, 20 % de cendres volantes et 30 % de fibres PP a montré une résistance à la compression améliorée de 37 MPa à 90 jours, proche d'un béton classique.

IV.5 Application des matériaux recyclés dans la construction durable :

L'application des matériaux recyclés dans la construction durable répond à plusieurs enjeux environnementaux, économiques et techniques. Ces matériaux permettent de réduire l'exploitation des ressources naturelles, de limiter les déchets envoyés en décharge et de diminuer l'empreinte carbone des bâtiments. En intégrant ces matériaux dans le béton, les routes, ou encore les structures non porteuses, on favorise une économie circulaire tout en maintenant des performances techniques acceptables, à condition de maîtriser leur dosage et leur traitement. Leur utilisation est particulièrement pertinente dans les ouvrages à faible exigence structurelle, les aménagements urbains ou encore comme composants de bétons innovants (bétons à propriétés isolantes, perméables, etc.). Cette démarche contribue ainsi à la transition vers un secteur du bâtiment plus responsable et respectueux de l'environnement.

IV.5.1 Bâtiments résidentiels et commerciaux :

De nombreux projets à travers le monde montrent comment les matériaux recyclés peuvent être intégrés avec succès dans la construction. Voici quelques exemples notables.

- **One World Trade Center, New York** : Environ 95% des matériaux issus de la démolition du World Trade Center ont été recyclés et utilisés pour la construction du One World Trade Center. Cela inclut l'acier et le béton recyclés (**Figure IV. 4**).



Figure IV. 4: One World Trade Center, New York.

Le Pavillon de la Serpentine Gallery, Londres :

Ce bâtiment temporaire construit chaque année a fait usage de matériaux recyclés dans plusieurs de ses éditions, notamment le bois et les plastiques, démontrant l'esthétique et la performance de ces matériaux (**Figure IV.5**).

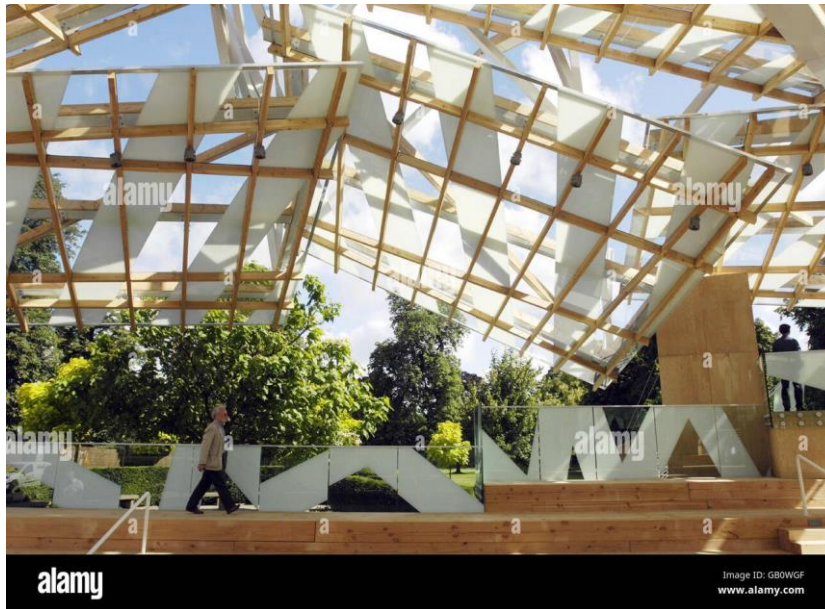


Figure IV.5 : Le Pavillon de la Serpentine Gallery, Londres.

- **EcoARK, Taipei :** Ce bâtiment est un exemple de la manière dont les plastiques recyclés peuvent être utilisés pour créer des structures de grande envergure. Construit à partir de bouteilles en PET recyclées, il offre une alternative durable aux matériaux de construction traditionnels. Il s'agit d'une grande salle de spectacle de trois étages avec un haut plafond, atteignant environ neuf étages à son point culminant et s'étendant sur 130 mètres de long. Le bâtiment est construit à partir de 1,52 million de bouteilles en PET recyclées (**Figure IV.6**).



Figure IV. 6 : EcoARK, Taipei une grande salle de spectacle.

IV.5.2 Infrastructure routière :

L'intégration de matériaux recyclés dans les infrastructures routières est une pratique croissante visant à améliorer la durabilité, réduire les coûts et limiter l'empreinte écologique des projets routiers. Voici quelques exemples notables :

- **États-Unis** : La ville de Los Angeles a collaboré avec TechniSoil Industrial pour utiliser des déchets plastiques recyclés dans la construction de routes, remplaçant ainsi le bitume traditionnel. Chaque 1,5 km de route utilise environ 2 300 kg de plastique recyclé, équivalant à environ 395 000 bouteilles en plastique.
- **Inde** : La municipalité de Bhubaneswar prévoit de transformer les déchets de construction et de démolition (C&D) ainsi que les déchets plastiques en matériaux de construction, tels que des pavés, des dalles de caniveau et des pierres de bordure, principalement pour des projets gouvernementaux.
- **Australie** : La société Downer Group a développé le "Reconophalt", un mélange d'asphalte incorporant des matériaux recyclés, notamment des plastiques souples, du verre, du toner de cartouches d'imprimante et de l'asphalte recyclé. Chaque kilomètre de route à deux voies pavées avec Reconophalt utilise environ 530 000 équivalents de sacs plastiques, 168 000 équivalents de bouteilles en verre et 12 500 cartouches d'imprimante usagées.

La startup néerlandaise PlasticRoad issue du grand groupe de construction VolkerWessels et de l'expert en plastique Wavin propose de recycler déchets plastiques pour en faire des chaussées. Ce procédé a été pensé à la fois pour remédier au problème des déchets plastiques, et pour contribuer à la protection du climat. L'objectif : rendre la ville de demain durable.

C'est ainsi que Anne Koudstaal, inventeur et chef de produit de la startup (PlasticRoad) et son équipe ont conçu un nouveau type de route (**Figure IV.7**), baptisée du même nom que la société, préfabriquée à partir de plastique recyclé. Sa structure creuse permet de stocker provisoirement l'eau de pluie, évacuée ensuite de façon progressive et contrôlée vers le sol. Une invention également précieuse en période de sécheresse.



Figure IV. 7 : Construction d'une piste cyclable de 30 mètres à Giethoorn, aux Pays-Bas.

IV.5.3 Ouvrages d'art :

L'utilisation de matériaux recyclés dans les ouvrages d'art (ponts, murs de soutènement, viaducs, etc.) s'inscrit dans une démarche de développement durable visant à réduire l'impact environnemental du secteur de la construction.

Pont en béton recyclé – Pays-Bas (Pont de Rutte) :

Le pont cyclable construit à Rutte illustre une approche durable grâce à l'utilisation de béton contenant jusqu'à 50 % de granulats recyclés. Les tests ont confirmé de bonnes performances mécaniques et une durabilité satisfaisante. Ce projet est reconnu comme un exemple d'économie circulaire appliquée aux infrastructures.

Viaduc de Cradle-to-Cradle – Allemagne :

Le viaduc autoroutier expérimental utilise du béton avec des granulats recyclés provenant de structures locales, ainsi que des aciers recyclés. Conçu pour être entièrement démontable, il permet de réduire fortement les émissions de CO₂ et les déchets de chantier. Ce projet illustre une avancée concrète vers une infrastructure plus durable et circulaire.

Reconstruction de murs de soutènement – France :

Dans le cadre de la réhabilitation de petits ouvrages d'art en zones rurales, l'utilisation de matériaux recyclés locaux, comme le béton concassé, a permis de fabriquer des blocs béton et de constituer des remblais. Cette solution a réduit les coûts de transport et de mise en décharge, tout en maintenant une performance structurelle comparable à celle des matériaux traditionnels.

Pont de Freemans Reach – Australie :

Dans le cadre du remplacement d'un ancien pont, le béton utilisé a intégré des cendres volantes et des granulats recyclés. Cette combinaison a permis d'améliorer la durabilité du matériau tout en limitant la consommation de ressources naturelles, illustrant une approche plus durable de la construction.

Projets pilotes en Afrique du Sud :

Des études ont été menées sur l'intégration de granulats recyclés, issus de bétons de démolitions urbaines, dans les fondations de ponts et d'ouvrages hydrauliques. Cette démarche vise à répondre à la demande croissante en infrastructures tout en réduisant les coûts de construction et en valorisant des matériaux existants.

IV.5.4 Applications dans les projets de rénovation :

L'utilisation de matériaux recyclés dans la réhabilitation d'anciennes structures est une approche de plus en plus courante, notamment dans les projets de rénovation ou de modernisation d'infrastructures vieillissantes (ponts, murs, tunnels, bâtiments historiques, etc.). Elle permet de réduire les coûts, limiter l'empreinte environnementale et prolonger la durée de vie des ouvrages existants.

Substitution partielle dans le béton de réparation :

Les granulats recyclés peuvent être utilisés pour produire du béton de réparation, employé pour :

- Le reprofilage de zones endommagées (poutres, tabliers, voiles),
- Le comblement de fissures ou cavités,
- La reconstitution de sections partiellement détériorées.

👉 Exemple : du béton contenant 20 à 50 % de granulats recyclés peut être appliqué par projection (gunitage) ou coulage dans des coffrages sur site.

Remblai et sous-couches de structures :

Dans les réhabilitations de murs de soutènement, routes ou fondations d'ouvrages d'art, des matériaux recyclés (béton concassé, enrobés recyclés, mâchefers) sont utilisés comme :

- Remblai technique derrière les murs,
- Couches de forme sous les dalles ou chaussées,
- Matériau drainant dans les zones enterrées.

👉 **Avantage** : remplacement de matériaux naturels tout en assurant une capacité portante suffisante.

Modules préfabriqués en béton recyclé :

Des éléments préfabriqués (blocs, dalles, bordures, éléments de parement) réalisés avec des granulats recyclés peuvent être intégrés à des structures existantes, notamment :

- En remplacement de parties endommagées,
- Pour la modernisation esthétique ou fonctionnelle d'un ouvrage (ex : garde-corps, parapets, revêtements).

👉 Ce procédé permet une pose rapide et un meilleur contrôle qualité.

Réemploi de matériaux issus de la structure existante :

Lorsqu'une structure est partiellement démolie ou décapée, les matériaux extraits (béton, pierre, acier) peuvent être :

- Concassés et réutilisés in situ ou à proximité,
- Intégrés dans le nouveau béton, après contrôle granulométrique et propreté.

👉 Cette méthode favorise une économie circulaire locale en limitant les transports et le gaspillage.

Renforcement structurel avec matériaux alternatifs :

Le renforcement structurel peut intégrer des matériaux recyclés ou alternatifs afin d'améliorer les performances tout en réduisant l'impact environnemental. Ces matériaux incluent notamment des fibres recyclées en plastique ou en acier, utilisées dans divers contextes :

- Béton fibré pour le renforcement de dalles,
- Mortiers renforcés pour la reprise de sections détériorées,
- Enrobés recyclés pour la réhabilitation de tabliers de ponts routiers,
- Béton concassé utilisé en remblai dans des zones rurales,

Combinaisons de techniques traditionnelles et matériaux recyclés pour des interventions sur ouvrages anciens. Ces solutions contribuent à prolonger la durée de vie des infrastructures tout en intégrant une logique de durabilité et d'économie circulaire.

IV.6 Avantages et inconvénients des évaluations des performances des matériaux recyclés :

IV.6.1 Avantages des performances des matériaux recyclés :

- Réduction des coûts de matériaux et de transport.
- Réduction de l'impact environnemental (moins d'extraction, moins de déchets).
- Valorisation des déchets de chantier.
- Maintien de la cohérence avec l'ouvrage existant (dans les cas patrimoniaux).

IV.6.2 Inconvénients et défis des matériaux recyclés :

Bien que les matériaux recyclés présentent de nombreux avantages, leur utilisation comporte également certains défis et inconvénients que les constructeurs et les architectes doivent prendre en compte :

- **Qualité et uniformité** : Les matériaux recyclés peuvent présenter des variations de qualité et des défauts, rendant leur intégration dans certains projets plus problématique qu'avec des matériaux neufs. Une certification rigoureuse et des tests de qualité sont souvent nécessaires.
- **Disponibilité limitée** : La disponibilité des matériaux recyclés est souvent limitée géographiquement, ce qui peut contraindre leur utilisation sur des projets éloignés des centres de recyclage.
- **Coûts de traitement** : Le traitement et la préparation des matériaux recyclés peuvent engendrer des coûts additionnels, notamment pour le nettoyage, la séparation et le traitement des contaminants.

Conclusion :

L'évaluation des performances des matériaux recyclés vise à déterminer dans quelle mesure ces matériaux peuvent remplacer efficacement les matériaux vierges dans différentes applications. Cette évaluation prend en compte plusieurs critères, notamment les propriétés mécaniques (résistance, rigidité, durabilité), les performances thermiques, la compatibilité avec d'autres matériaux, ainsi que l'impact environnemental global.

Les résultats montrent que, bien que certains matériaux recyclés présentent des performances légèrement inférieures à celles des matériaux neufs, ils restent adaptés à de nombreuses

utilisations, surtout dans les domaines où les contraintes techniques sont modérées. L'ajout d'additifs ou le mélange avec des matières vierges permet souvent d'améliorer leurs caractéristiques.

Par ailleurs, les matériaux recyclés offrent un avantage considérable en matière de durabilité environnementale, en réduisant les émissions de CO₂, la consommation d'énergie et la dépendance aux ressources non renouvelables.

Ainsi, une utilisation judicieuse des matériaux recyclés peut répondre à la fois aux exigences techniques et aux objectifs de développement durable.

***Conclusion
générale et
recommandations***

Conclusion Générale :

Dans un contexte où les défis environnementaux sont devenus majeurs, le secteur du bâtiment et des travaux publics, bien qu'indispensable au développement socio-économique, se trouve aujourd'hui à un tournant décisif. Responsable d'une part importante de la consommation énergétique mondiale, des émissions de gaz à effet de serre et de la production de déchets, ce secteur doit impérativement repenser ses pratiques pour s'inscrire dans une logique de durabilité.

À travers ce mémoire, nous avons mis en lumière l'un des leviers les plus prometteurs pour accompagner cette transition : la valorisation des déchets de construction et de démolition. Ces matériaux, longtemps relégués au statut de rebuts, offrent aujourd'hui un potentiel important en tant que ressources secondaires, capables de se substituer partiellement aux matériaux traditionnels, tout en contribuant à la réduction de l'empreinte écologique des chantiers.

Notre étude a permis de dresser un état des lieux des types de matériaux recyclés les plus couramment utilisés, d'évaluer leurs performances techniques, environnementales et économiques, et de recenser leurs applications dans différents types d'ouvrages. Elle a également mis en évidence les freins persistants à leur intégration, notamment les incertitudes sur leurs performances à long terme, l'absence de normalisation claire, les réticences des acteurs du secteur, et les contraintes logistiques et économiques.

Malgré ces obstacles, les résultats de ce travail montrent que les matériaux recyclés issus de la démolition constituent une réelle opportunité pour inscrire le BTP dans une démarche d'économie circulaire. Leur utilisation, lorsqu'elle est bien encadrée et maîtrisée, permet non seulement de limiter l'exploitation des ressources naturelles, mais aussi de réduire significativement les déchets et les émissions liées aux activités de construction.

Afin de favoriser une adoption plus large de ces pratiques, plusieurs axes d'amélioration peuvent être envisagés : le renforcement des normes et des certifications, la sensibilisation des professionnels, le développement d'outils de caractérisation et de traçabilité des matériaux recyclés, ainsi que la mise en place d'incitations économiques et réglementaires.

En somme, ce mémoire s'inscrit dans une perspective de contribution à la transition écologique du BTP. Il invite à repenser la manière de construire, non plus en consommant toujours plus de ressources vierges, mais en valorisant les ressources existantes, dans une logique de durabilité, de responsabilité et d'innovation.

Recommandations futures :

Malgré les progrès de la recherche sur l'économie circulaire (EC) dans le secteur de la construction, plusieurs domaines critiques nécessitent des recherches plus approfondies. Tout d'abord, des études plus empiriques sont nécessaires pour évaluer la viabilité économique des pratiques de construction circulaire, en particulier dans les régions en développement où les limitations financières et infrastructurelles restent des obstacles majeurs [13,87]. Les chercheurs devraient étudier comment les mécanismes politiques tels que les directives sur les produits écologiques et les mécanismes de crédit de taxes circulaires peuvent encourager la construction durable tout en garantissant la rentabilité pour les parties prenantes [88,89]. La valorisation des déchets dans les industries à fort impact est une voie cruciale à explorer.

Comme l'ont souligné Kazamias et Zorpas (2021) [90], l'industrie pétrolière et gazière a mis en œuvre avec succès des critères de fin de vie des déchets pour réutiliser les déblais de forage en matériaux de construction, démontrant ainsi que les sous-produits industriels peuvent être réintégrés dans l'environnement bâti par le biais de stratégies circulaires [90]. L'application de principes similaires aux déchets de construction et de démolition (C&DW) pourrait conduire à des voies innovantes de valorisation des matériaux, garantissant que des ressources précieuses ne sont pas mises au rebut mais réorientées vers des marchés secondaires. Les recherches futures devraient examiner comment les protocoles de qualité, les incitations réglementaires et les partenariats industriels peuvent faciliter l'adoption à grande échelle de ces stratégies de valorisation des déchets dans la construction.

En outre, les recherches futures devraient se concentrer sur l'évolutivité des innovations numériques, en évaluant comment la surveillance des déchets basée sur l'intelligence artificielle (IA) et les techniques de démolition intelligentes peuvent être largement adoptées sur les différents marchés de la construction [91,92]. Le développement de systèmes de suivi des déchets et d'analyses prédictives pour l'optimisation des ressources sera essentiel pour accroître l'efficacité et la conformité des processus de recyclage de C&DW. Toutefois, comme le souligne Zorpas (2024 [93]), le cadre de l'économie circulaire va au-delà du modèle traditionnel « réduire, réutiliser, Son étude souligne la nécessité d'un système de classification plus complet et normalisé pour les stratégies de hiérarchie des déchets, qui pourrait mieux informer les cadres politiques, les directives de construction et les évaluations du cycle de vie des matériaux [93]. Il sera essentiel de comprendre les facteurs techniques, économiques et réglementaires de ces transformations numériques pour combler les lacunes actuelles en matière d'adoption des technologies dans la gestion des déchets de C&D. Les collaborations interdisciplinaires entre

les spécialistes de l'environnement, les ingénieurs en matériaux et les urbanistes sont cruciales pour développer des cycles de matériaux en boucle fermée dans la construction [94]. Les recherches menées par Barreca et al. (2023) [95] ont mis l'accent sur le potentiel des matériaux de construction biosourcés, des méthodes de déconstruction avancées et de l'intégration des marchés secondaires, qui pourraient contribuer à affiner les stratégies à long terme de réduction des volumes de déchets de C&D [95].

Enfin, il convient de poursuivre les recherches sur les dimensions socio-économiques de l'EC dans la construction, y compris la perception des parties prenantes, l'adaptation de la main-d'œuvre et la demande des consommateurs pour des bâtiments circulaires. Comprendre comment les facteurs comportementaux et les attitudes culturelles influencent l'adoption de l'EC dans différentes régions fournira des informations précieuses aux décideurs politiques et aux dirigeants de l'industrie. La transition vers une économie circulaire dans la gestion des déchets de construction et de démolition est une transformation complexe mais nécessaire. À l'avenir, des recherches ciblées, des réformes politiques et des investissements stratégiques seront essentiels pour appliquer les principes de l'économie circulaire à l'environnement bâti. Grâce à des efforts holistiques et interdisciplinaires, le secteur de la construction peut contribuer de manière significative à un avenir durable et adapté.

*Références
bibliographiques*

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

- [1] V. Bhavsar, S.R. Sridharan, J.S. Sudarsan, Barriers to circular economy practices during construction and demolition waste management in an emerging economy, *Resour. Conserv. Recycl. Adv.* 20 (2023) 200198.
- [2] L.A. López Ruiz, X. Roca Ramón, S. Gassó Domingo, The circular economy in the construction and demolition waste sector – A review and an integrative model approach, *J. Clean. Prod.* 248 (2020) 119238. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119238>.
- [3] S.H. Ghaffar, M. Burman, N. Braimah, Pathways to circular construction: An integrated management of construction and demolition waste for resource recovery, *J. Clean. Prod.* 244 (2020) 118710. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118710>.
- [4] Melanie Rašković, Arne M Ragossnig, Krzysztof Kondracki, Michaela Ragossnig-Angst, Clean construction and demolition waste material cycles through optimised pre-demolition waste audit documentation: A review on building material assessment tools, *Waste Manag. Res.* 38 (2020) 923–941. <https://doi.org/10.1177/0734242X20936763>.
- [5] S. Türkeli, R. Kemp, B. Huang, R. Bleischwitz, W. McDowall, Circular economy scientific knowledge in the European Union and China: A bibliometric, network and survey analysis (2006–2016), *J. Clean. Prod.* 197 (2018) 1244–1261. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.118>.
- [6] E. Commission, A new circular economy action plan for a cleaner and more competitive Europe, *Eur. Comm. Brussels, Belgium* (2020) 1–20.
- [7] P. Ghisellini, C. Cialani, S. Ulgiati, A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems, *J. Clean. Prod.* 114 (2016) 11–32. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>.
- [8] C. Zhang, M. Hu, F. Di Maio, B. Sprecher, X. Yang, A. Tukker, An overview of the waste hierarchy framework for analyzing the circularity in construction and demolition waste management in Europe, *Sci. Total Environ.* 803 (2022) 149892. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149892>.
- [9] M. Spišáková, T. Mandíček, P. Mésároš, M. Špak, Waste management in a sustainable circular economy as a part of design of construction, *Appl. Sci.* 12 (2022) 4553.
- [10] J. Kirchherr, D. Reike, M. Hekkert, Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions, *Resour. Conserv. Recycl.* 127 (2017) 221–232. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>.
- [11] N. Elshaboury, A. Al-Sakkaf, E. Mohammed Abdelkader, G. Alfalah, 2022 Construction and Demolition Waste Management Research.pdf, *Int. J. Environ. Res. Public Health* 19 (2022) 4496.
- [12] P. Antwi-Afari, S.T. Ng, M.U. Hossain, A review of the circularity gap in the construction industry through scientometric analysis, *J. Clean. Prod.* 298 (2021) 126870. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126870>.
- [13] R. Charef, J.C. Morel, K. Rakhshan, Barriers to implementing the circular economy in the construction industry: A critical review, *Sustain.* 13 (2021) 1–18. <https://doi.org/10.3390/su132312989>.
- [14] A. Luciano, L. Cutaia, P. Altamura, E. Penalvo, Critical issues hindering a widespread construction and demolition waste (CDW) recycling practice in EU countries and actions to undertake: The stakeholder's perspective, *Sustain. Chem. Pharm.* 29 (2022) 100745. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scp.2022.100745>.
- [15] M.T. Ali, I. Rahman, N. Dev, P. Singh, Evaluation of the Feasibility of Recycled Concrete

- Aggregate for Producing Structural Concrete, in: E3S Web Conf., EDP Sciences, 2020: p. 1098.
- [16] V.W.Y. Tam, M. Soomro, A.C.J. Evangelista, Quality improvement of recycled concrete aggregate by removal of residual mortar: A comprehensive review of approaches adopted, *Constr. Build. Mater.* 288 (2021) 123066.
- [17] I. Papamichael, I. Voukkali, P. Loizia, A.A. Zorpas, Construction and demolition waste framework of circular economy: A mini review, *Waste Manag. Res.* 41 (2023) 1728–1740.
- [18] V. Tomar, A. Dhillon, D. Kumar, Challenges and Factors in Plastics Reutilization/Recycling, (2020).
- [19] C. Cimpan, A. Maul, M. Jansen, T. Pretz, H. Wenzel, Central sorting and recovery of MSW recyclable materials: A review of technological state-of-the-art, cases, practice and implications for materials recycling, *J. Environ. Manage.* 156 (2015) 181–199. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.03.025>.
- [20] C. Chang, F. Di Maio, R. Bheemireddy, P. Posthoorn, A.T. Gebremariam, P. Rem, Rapid quality control for recycled coarse aggregates (RCA) streams: Multi-sensor integration for advanced contaminant detection, *Comput. Ind.* 164 (2025) 104196. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2024.104196>.
- [21] A. Ossa, J.L. Garc  a, E. Botero, Use of recycled construction and demolition waste (CDW) aggregates: A sustainable alternative for the pavement construction industry, *J. Clean. Prod.* 135 (2016) 379–386.
- [22] J. Kim, Influence of quality of recycled aggregates on the mechanical properties of recycled aggregate concretes: An overview, *Constr. Build. Mater.* 328 (2022) 127071.
- [23] R.S. Paranhos, B.G. Cazac  iu, C.H. Sampaio, C.O. Petter, R.O. Neto, F. Huchet, A sorting method to value recycled concrete, *J. Clean. Prod.* 112 (2016) 2249–2258.
- [24] S.-C. Kou, C.-S. Poon, Long-term mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete prepared with the incorporation of fly ash, *Cem. Concr. Compos.* 37 (2013) 12–19.
- [25] D. Ferr  ndez, P. Saiz, A. Zaragoza-Benzal, J.A. Z  niga-Vicente, Towards a more sustainable environmentally production system for the treatment of recycled aggregates in the construction industry: An experimental study, *Heliyon* 9 (2023).
- [26] K. Oikonomopoulou, S. Ioannou, P. Savva, M. Spanou, D. Nicolaides, M.F. Petrou, Effect of Mechanically Treated Recycled Aggregates on the Long Term Mechanical Properties and Durability of Concrete, *Materials (Basel)*. 15 (2022). <https://doi.org/10.3390/ma15082871>.
- [27] D. Pedro, J. de Brito, L. Evangelista, Influence of the Crushing Process of Recycled Aggregates on Concrete Properties, *Key Eng. Mater.* 634 (2015) 151–162. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.634.151>.
- [28] H. Nautiyal, V. Shree, S. Khurana, N. Kumar, V. Goel, Recycling Potential of Building Materials: A Review, in: 2015: pp. 31–50. https://doi.org/10.1007/978-981-287-643-0_2.
- [29] S. Delvoie, Z. Zhao, F. Michel, L. Courard, WPT1-Technical report of the best-practice in producing recycled aggregates and sands, (2018).
- [30] R.K. Dhir, J. de Brito, R. V Silva, C.Q. Lye, Processing of recycled aggregates, *Sustain. Constr. Mater.* (2019) 57–88.
- [31] M. Frigione, Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete, *Waste Manag.* 30 (2010) 1101–1106. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.01.030>.
- [32] N. Saikia, J. De Brito, Waste polyethylene terephthalate as an aggregate in concrete, *Mater. Res.* 16 (2013) 341–350. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392013005000017>.
- [33] P. Vasanthi, S.S. Selvan, Study on mechanical performance of recycled aggregate concrete

- p with modified nano silica in cement,
- Int. J. Adv. Sci. Technol.*
- 29 (2020).
- [34] J.-M. Lessard, Optimisation des cendres volantes et grossières de bio-masse dans les bétons compactés au rouleau et dans les bétons moulés à sec, (2016) 144. http://savoirs.usherbrooke.ca/bitstream/handle/11143/8831/Lessard_Jean_Martin_MScA_2016.pdf?sequence=6&isAllowed=y.
- [35] S. Barbhuiya, B. Bhushan Das, F. Kanavaris, Biochar-concrete: A comprehensive review of properties, production and sustainability, *Case Stud. Constr. Mater.* 20 (2024) e02859. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e02859>.
- [36] W.M. Shaban, J. Yang, H. Su, K.H. Mo, L. Li, J. Xie, Quality improvement techniques for recycled concrete aggregate: A review, *J. Adv. Concr. Technol.* 17 (2019) 151–167.
- [37] A. Miatto, H. Schandl, L. Forlin, F. Ronzani, P. Borin, A. Giordano, H. Tanikawa, A spatial analysis of material stock accumulation and demolition waste potential of buildings: A case study of Padua, *Resour. Conserv. Recycl.* 142 (2019) 245–256. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.12.011>.
- [38] N. Kisku, H. Joshi, M. Ansari, S.K. Panda, S. Nayak, S.C. Dutta, A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material, *Constr. Build. Mater.* 131 (2017) 721–740. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.029>.
- [39] I. Marie, H. Quiasrawi, Closed-loop recycling of recycled concrete aggregates, *J. Clean. Prod.* 37 (2012) 243–248.
- [40] S. Barbhuiya, F. Kanavaris, B.B. Das, M. Idrees, Decarbonising cement and concrete production: Strategies, challenges and pathways for sustainable development, *J. Build. Eng.* (2024) 108861.
- [41] H.G. Gebremariam, S. Taye, A.G. Tarekegn, Parent concrete strength effects on the quality of recycled aggregate concrete: a review, *Heliyon* 10 (2024).
- [42] F. Muhammad, M. Harun, A. Ahmed, N. Kabir, H.R. Khalid, A. Hanif, Influence of bonded mortar on recycled aggregate concrete properties: A review, *Constr. Build. Mater.* 432 (2024) 136564.
- [43] F. Stochino, M. Zucca, M. Simoncelli, A. Alibeigibeni, G. Concu, M. Valdes, M.A. Pisani, C. Bernuzzi, M. Saccone, L. Pani, Experimental Investigation on the Structural Performance of Steel-Concrete Composite Slabs Incorporating Recycled Aggregates from Construction and Demolition Waste, in: *Int. Conf. Behav. Steel Struct. Seism. Areas*, Springer, 2024: pp. 108–117.
- [44] A. Alibeigibeni, F. Stochino, M. Zucca, F.L. Gayarre, Enhancing Concrete Sustainability: A Critical Review of the Performance of Recycled Concrete Aggregates (RCAs) in Structural Concrete, *Buildings* 15 (2025) 1–25. <https://doi.org/10.3390/buildings15081361>.
- [45] H.B. Le, Q.B. Bui, L. Tang, Geopolymer recycled aggregate concrete: From experiments to empirical models, *Materials (Basel)* 14 (2021) 1–22. <https://doi.org/10.3390/ma14051180>.
- [46] Z. Wang, W. Xie, J. Liu, Regional differences and driving factors of construction and demolition waste generation in China, *Eng. Constr. Archit. Manag.* 29 (2022) 2300–2327.
- [47] S. Ismail, M. Ramli, Engineering properties of treated recycled concrete aggregate (RCA) for structural applications, *Constr. Build. Mater.* 44 (2013) 464–476.
- [48] C. Feng, B. Cui, J. Wang, H. Guo, W. Zhang, J. Zhu, Changing the soaking method of microbially induced calcium carbonate precipitation technology to improve the reinforcement effect of recycled concrete aggregates, *J. Build. Eng.* 68 (2023) 106128.
- [49] L. Pani, L. Francesconi, J. Rombi, F. Mistretta, M. Sassu, F. Stochino, Effect of parent concrete on the performance of recycled aggregate concrete, *Sustainability* 12 (2020) 9399.
- [50] L.W. Zhang, A.O. Sojobi, V.K.R. Kodur, K.M. Liew, Effective utilization and recycling of

- p mixed recycled aggregates for a greener environment,
- J. Clean. Prod.*
- 236 (2019) 117600.
- [51] X. Xu, Y. Luo, A. Sreeram, Q. Wu, G. Chen, S. Cheng, Z. Chen, X. Chen, Potential use of recycled concrete aggregate (RCA) for sustainable asphalt pavements of the future: A state-of-the-art review, *J. Clean. Prod.* 344 (2022) 130893.
- [52] R. V Silva, J. de Brito, R.K. Dhir, Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production, *Constr. Build. Mater.* 65 (2014) 201–217.
- [53] L. Evangelista, J. De Brito, Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates, *Cem. Concr. Compos.* 29 (2007) 397–401.
- [54] C.-C. Fan, R. Huang, H. Hwang, S.-J. Chao, Properties of concrete incorporating fine recycled aggregates from crushed concrete wastes, *Constr. Build. Mater.* 112 (2016) 708–715.
- [55] L. Evangelista, J. De Brito, Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates, *Cem. Concr. Compos.* 32 (2010) 9–14.
- [56] H. Yaprak, H. ARUNTAŞ, I. Demir, O. ŞİMŞEK, G. DURMUŞ, Effects of the fine recycled concrete aggregates on the concrete properties, *Int. J. Phys. Sci.* 6 (2011).
- [57] F. Cartuxo, J. De Brito, L. Evangelista, J.R. Jimenez, E.F. Ledesma, Rheological behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates—Influence of the superplasticizer, *Constr. Build. Mater.* 89 (2015) 36–47.
- [58] F. Cartuxo, J. De Brito, L. Evangelista, J.R. Jiménez, E.F. Ledesma, Increased durability of concrete made with fine recycled concrete aggregates using superplasticizers, *Materials (Basel)*. 9 (2016) 98.
- [59] R. Kumar, S.C.B. Gurram, A.K. Minocha, Influence of recycled fine aggregate on microstructure and hardened properties of concrete, *Mag. Concr. Res.* 69 (2017) 1288–1295.
- [60] B.A. Herki, J.M. Khatib, E.M. Negim, Lightweight concrete made from waste polystyrene and fly ash, *World Appl. Sci. J.* 21 (2013) 1356–1360.
<https://doi.org/10.5829/idosi.wasj.2013.21.9.20213>.
- [61] X. Yang, Y. Liu, J. Liang, Y. Meng, H. Rong, D. Li, Y. Chen, J. Lv, Y. Jiang, Y. Liu, Straightening methods for RCA and RAC—A review, *Cem. Concr. Compos.* 141 (2023) 105145.
- [62] G. Dimitriou, P. Savva, M.F. Petrou, Enhancing mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete, *Constr. Build. Mater.* 158 (2018) 228–235.
- [63] M. Etxeberria, E. Vázquez, A. Marí, M. Barra, Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete, *Cem. Concr. Res.* 37 (2007) 735–742. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.02.002>.
- [64] R.V. Silva, J. De Brito, R.K. Dhir, Establishing a relationship between modulus of elasticity and compressive strength of recycled aggregate concrete, *J. Clean. Prod.* 112 (2016) 2171–2186.
- [65] S.M.S. Kazmi, M.J. Munir, Y.-F. Wu, I. Patnaikuni, Y. Zhou, F. Xing, Influence of different treatment methods on the mechanical behavior of recycled aggregate concrete: A comparative study, *Cem. Concr. Compos.* 104 (2019) 103398.
- [66] S. Braymand, S. Roux, V. Vial, J. Bertola, B. Cazacliu, Collaborative laboratory experiments to measure the rate of CO₂ captured after accelerated carbonation by a calcimetric method, in: 1st RILEM Int. Conf. Miner. Carbonation Cem. Concr. 16-17th April 2024, Aachen, Ger., 2024.
- [67] T. Jiang, X. Cao, H. Duan, K. Shu, Recycling efficiency mechanism of recycled concrete aggregate to improve the CO₂ uptake and anti-leakage properties of CO₂ sequestration functional backfills, *Constr. Build. Mater.* 458 (2025) 139663.

- [68] P. Ang, W. Goh, J. Bu, S. Cheng, Assessing carbon capture and carbonation in recycled concrete aggregates: A holistic life cycle assessment perspective with simulation at industrial scale, *J. Clean. Prod.* 474 (2024) 143553.
- [69] K.H. Tham, T. Seah, Q.Y. Kouk, W. Goh, S. Cheng, C. Wang, J. Bu, L. Tao, Developing an integrated CO₂ capture and mineralization process with lower energy consumption, *Int. J. Energy Water Resour.* (2024) 1–10.
- [70] Y. Chong, G.F. Chua, M. Zhao, C. Yip, S.B. Daneti, F. Jin, Aqueous CO₂ Sequestration for Low-Carbon Ready-Mix Concrete, (2024).
- [71] W. Huang, H. Wang, Comprehensive assessment of engineering and environmental attributes of geopolymer pervious concrete with natural and recycled aggregate, *J. Clean. Prod.* 468 (2024) 143138.
- [72] X. Huang, Z. Huang, Y. Zhou, R. Hu, B. Hu, Life cycle assessment and cost analysis of LC3 concrete considering sustainability and uncertainty, *J. Build. Eng.* (2025) 111960.
- [73] X. Ma, H. Hu, Y. Luo, W. Yao, Y. Wei, A. She, A carbon footprint assessment for usage of recycled aggregate and supplementary cementitious materials for sustainable concrete: A life-cycle perspective in China, *J. Clean. Prod.* 490 (2025) 144772.
- [74] S. Pradhan, S. Kumar, S. V Barai, Particle Packing Method for Recycled Aggregate Concrete, Springer, 2024.
- [75] A. Dias, S. Nezami, J. Silvestre, R. Kurda, R. Silva, I. Martins, J. de Brito, Environmental and Economic Comparison of Natural and Recycled Aggregates Using LCA, *Recycling* 7 (2022). <https://doi.org/10.3390/recycling7040043>.
- [76] V.W.Y. Tam, Economic comparison of concrete recycling: A case study approach, *Resour. Conserv. Recycl.* 52 (2008) 821–828.
- [77] E.A. Ohemeng, S.O. Ekololu, Comparative analysis on costs and benefits of producing natural and recycled concrete aggregates: A South African case study, *Case Stud. Constr. Mater.* 13 (2020) e00450.
- [78] A.M. Braga, J.D. Silvestre, J. de Brito, Compared environmental and economic impact from cradle to gate of concrete with natural and recycled coarse aggregates, *J. Clean. Prod.* 162 (2017) 529–543.
- [79] N. Tošić, S. Marinković, T. Dašić, M. Stanić, Multicriteria optimization of natural and recycled aggregate concrete for structural use, *J. Clean. Prod.* 87 (2015) 766–776.
- [80] B. Estanqueiro, J. Dinis Silvestre, J. de Brito, M. Duarte Pinheiro, Environmental life cycle assessment of coarse natural and recycled aggregates for concrete, *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* 22 (2018) 429–449.
- [81] A. Ben Fraj, R. Idir, Concrete based on recycled aggregates–Recycling and environmental analysis: A case study of paris’ region, *Constr. Build. Mater.* 157 (2017) 952–964.
- [82] M.U. Hossain, C.S. Poon, I.M.C. Lo, J.C.P. Cheng, Comparative environmental evaluation of aggregate production from recycled waste materials and virgin sources by LCA, *Resour. Conserv. Recycl.* 109 (2016) 67–77. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.02.009>.
- [83] S. Marinković, V. Radonjanin, M. Malešev, I. Ignjatović, Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete, *Waste Manag.* 30 (2010) 2255–2264. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.04.012>.
- [84] W.-J. Park, T. Kim, S. Roh, R. Kim, Analysis of life cycle environmental impact of recycled aggregate, *Appl. Sci.* 9 (2019) 1021.
- [85] E.D.E. Programme, T.D.E.L.A. Declaration, N.D.E.L.A. Declaration, DEP moyenne pour granulats pierreux, (2018).

- [86] P. Matar, R. El Dalati, Caractéristiques du béton à base de granulats recyclés. Etude expérimentale, *Ann. Du Bâtiment Des Trav. Publics* (2012) 32–39.
- [87] P. Mhatre, V. V Gedam, S. Unnikrishnan, R.D. Raut, Circular economy adoption barriers in built environment- a case of emerging economy, *J. Clean. Prod.* 392 (2023) 136201. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136201>.
- [88] S. Shooshtarian, T. Maqsood, P.S.P. Wong, L. Bettini, Application of sustainable procurement policy to improve the circularity of construction and demolition waste resources in Australia, *Mater. Circ. Econ.* 4 (2022) 27.
- [89] C.S. Goh, F. Su, S. Rowlinson, Exploring economic impacts of sustainable construction projects on stakeholders: The role of integrated project delivery, *J. Leg. Aff. Disput. Resolut. Eng. Constr.* 15 (2023) 4523026.
- [90] G. Kazamias, A.A. Zorpas, Drill cuttings waste management from oil & gas exploitation industries through end-of-waste criteria in the framework of circular economy strategy, *J. Clean. Prod.* 322 (2021) 129098.
- [91] L. Wu, W. Lu, Z. Peng, C. Webster, A blockchain non-fungible token-enabled ‘passport’ for construction waste material cross-jurisdictional trading, *Autom. Constr.* 149 (2023) 104783. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104783>.
- [92] F. Xiong, C. Xu, W. Ren, R. Zheng, P. Gong, Y. Ren, A blockchain-based edge collaborative detection scheme for construction internet of things, *Autom. Constr.* 134 (2022) 104066. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.104066>.
- [93] A.A. Zorpas, The hidden concept and the beauty of multiple “R” in the framework of waste strategies development reflecting to circular economy principles, *Sci. Total Environ.* 952 (2024) 175508. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175508>.
- [94] L. Anselmi, V. Rognoli, Emerging materials fostering interdisciplinary collaboration in Materials Design, in: *Interdiscip. Pract. Ind. Des.*, AHFE Open Access, 2023: pp. 119–129.
- [95] F. Barreca, G. Cardinali, A. Barbaresi, M. Bovo, Bio-based building components: A newly sustainable solution for traditional walls made of *Arundo donax* and gypsum, *Heat Transf.* 52 (2023) 5166–5183.