UNIVERSITÉ YAHIA FARÈS DE MÉDÉA

Faculté de Technologie

Département de Génie Civil

Laboratoire Matériaux et Environnement (LME)

THÈSE DE DOCTORAT

Spécialité : Génie Civil

Option : Matériaux Innovants et Environnement

Thème

Élaboration d'un matériau de construction innovant allégé par Polystyrène granulé et Copeaux de bois

Par

Mme. BENCHOUAF Amina

Devant le jury composé de :

Boukendakdji Otmane	Professeur	Université de Médéa	Président
Debieb Farid	Professeur	Université de Médéa	Directeur de thèse
Boucherit Dalila	MCA	Université de Médéa	Co-directeur de thèse
Safiddine Salim	MCA	Université de Médéa	Examinateur
Soualhi Hamza	MCA	Université de Laghouat	Examinateur
Kadri El Hadj	Professeur	CY Cergy Paris Université France	Invité

2025

REMERCIMENTS

Avant toute chose, je tiens à remercier **ALLAH**, le Tout-Puissant, pour m'avoir guidée sur le chemin de la lumière et du savoir, et pour m'avoir donné le courage, la volonté et la persévérance nécessaires à l'accomplissement de ce modeste travail.

Je tiens à exprimer ma plus profonde gratitude à mon directeur de thèse, **Pr. DEBIEB Farid**, pour son encadrement précieux, sa disponibilité, sa patience, et la confiance qu'il m'a accordée tout au long de cette recherche. Son expertise et ses conseils ont été une source inestimable d'inspiration.

Mes remerciements vont également à mes co-directeurs de thèse, **Pr. KADRI El-Hadj** et **Dr. BOUCHERIT Dalila**, pour leur rigueur scientifique, leur accompagnement constant, et leurs encouragements. Leur soutien et leurs précieux conseils ont été indispensables au bon déroulement de ce travail.

Je souhaite également exprimer ma gratitude à **Monsieur MOULOUD Sofiane**, directeur du Laboratoire de Recherches de Génie Civil (Hall Technologique) de l'Université de Médéa, pour sa précieuse collaboration. Mes remerciements s'étendent à tout le personnel du laboratoire, qui m'a aidée avec dévouement lors de la réalisation de la partie expérimentale, en me fournissant les matériaux et l'équipement nécessaires à la réussite de ce projet.

Je ne saurais oublier de remercier chaleureusement **tous les enseignants** du département de Génie civil de l'Université de Médéa, ainsi que **tous les enseignants** qui ont contribué à ma formation au fil des années. Leur enseignement et leur bienveillance ont largement contribué à mon parcours académique.

Mes sincères remerciements s'adressent aussi aux **ingénieurs du Centre de Recherche Scientifique et Technique en Analyses Physico-Chimiques (CRAPC), M. Djafar Safar Zitoun, M. Cham Eddine et M. Saadi Mohammed** pour leur accueil chaleureux, leur disponibilité et leur sympathie, malgré l'importance de leurs responsabilités. Ce fut un réel plaisir de travailler à leurs côtés, et je garde un excellent souvenir de cette collaboration.

Je souhaite également exprimer ma reconnaissance envers le **directeur, les ingénieurs et les architectes de la Société d'Études Techniques & d'Architecture (SETAM)** pour leur aide précieuse et leur disponibilité tout au long de cette aventure.

À toutes ces personnes qui ont, de près ou de loin, contribué à la réalisation de cette thèse, je vous adresse mes plus sincères remerciements. Votre soutien, vos encouragements et votre confiance ont été essentiels à la réussite de ce travail.

DEDICACE

Enfin, le jour tant attendu est arrivé. Celui qui honore ceux qui m'ont donné la vie et m'ont soutenue dans chaque étape de ce long chemin. C'est avec un immense honneur, une fierté profonde et une reconnaissance infinie que je dédie ce travail, fruit de tant d'efforts et de sacrifices. Dieu, ainsi que mes parents, savent combien je me suis investie, depuis mes premiers pas à l'école maternelle jusqu'à aujourd'hui. Merci infiniment, mon bon Dieu, de m'avoir guidée.

À mes parents, mes piliers de vie

Aucun mot ne saurait exprimer toute ma gratitude et mes remerciements pour tout ce que vous m'avez donné.

Maman, ta tendresse, ta bonté, ton amour inconditionnel et tes innombrables sacrifices sont les plus grandes sources d'inspiration de ma vie. Tu es le symbole de la mère parfaite, et je sais que c'est grâce à tes prières, véritables phares dans la nuit, que j'ai trouvé la force de travailler sans relâche, même durant les nuits les plus froides.

Papa, aucun mot sur une simple page ne pourra jamais rendre hommage à la grandeur de ton sacrifice, de ton amour et de ton soutien infaillible. Ce travail, je te le dédie avec un immense respect, mais surtout avec un baiser sur tes mains, celles qui ont tant œuvré pour moi. Merci, papa, pour ta confiance et ta présence indéfectible. Tu as toujours cru en moi, même lorsque j'avais des doutes, et tu as su me donner la motivation dont j'avais besoin aux moments les plus difficiles.

À mon mari, mon roc, qui m'a soutenue dans cette aventure. Merci pour ta patience, ton amour, et pour avoir été à mes côtés dans chaque instant difficile et dans chaque moment de joie.

À mon bébé, qui a été ma plus grande source de courage et de motivation pour aller jusqu'au bout de ce parcours.

À mes frères et sœurs, Billel, Nour El Houda, Lydia, et Melissa, pour votre soutien moral, vos encouragements constants, et tout l'amour que vous m'avez apporté.

À mes petits neveux, Nazim et Malak, vos sourires et votre innocence ont illuminé mes journées. Je vous souhaite à tous une vie remplie de succès.

À mon professeur Farid DEBIEB, merci pour votre accompagnement précieux, vos conseils avisés et votre soutien sans faille.

À toute la famille Benchouaf et Benkerri, pour votre soutien inestimable.

À F. Lydia, amie fidèle de notre famille, pour ton amitié indéfectible et ton soutien précieux.

À ma meilleure amie, Wafa, qui n'a jamais cessé de croire en moi, même dans les moments de doute. Merci pour ton amitié sincère et ton soutien constant.

À chacun de vous, je dédie ce travail avec tout mon amour, ma reconnaissance, et mes vœux de bonheur et de succès.

ملخص

في مواجهة التحديات المتزايدة المتعلقة بالاستدامة وكفاءة الطاقة في قطاع البناء، أصبحت الابتكارات في المواد ضرورية. يوفر الخرسانة الخفيفة، التي تستخدم مواد حبيبية بديلة للمواد الطبيعية مثل حبيبات البوليسترين ونشارة الخشب، حلاً واعدًا. تُظهر مراجعة الأدبيات إمكانات كبيرة لهذه المواد في تخفيف الهياكل مع تحسين الخصائص الحرارية والميكانيكية، مما يبرر دراسة متعمقة لاستخدامها المشترك.

يعتمد هذا البحث على منهج تجريبي يجمع بين صياغة خلطات خرسانية تتضمن البوليسترين الموسع ونشارة الخشب المعالجة. في هذه الدراسة، تم استخدام نشارة الخشب المعالجة من مخلفات النجارة وحبيبات البوليسترين الموسع ومزيج المادتين عن طريق استبدال الرمل الطبيعي لصنع الخرسانة الرملية (SC) بنسب خلط مختلفة (0٪، 10٪، 20٪، 30٪، 40٪، و 50٪) حسب حجم الرمل. ثم تم استكشاف سلوك عينات الخرسانة الرملية الخفيفة.

أظهرت النتائج أن دمج البوليسترين ونشارة الخشب في الخرسانة الرملية يقلل بشكل كبير من كثافة المادة مع الحفاظ على أداء ميكانيكي مرضٍ. تشير الاختبارات الحرارية إلى تحسن ملحوظ في العزل، مع تقليل التوصيل الحراري مقارنة بالخرسانة التقليدية. بالإضافة إلى ذلك، سمحت المعالجة الخاصة لنشارة الخشب والبوليسترين بتحسين توافقها مع الأسمنت، مما يزيد من تماسك المادة النهائية.

تظهر هذه الدراسة أن الاستخدام المشترك للبوليسترين الممدد ونشارة الخشب في الخرسانة الخفيفة يشكل ابتكارًا قابلاً للتطبيق للبناء المستدام. تشير النتائج إلى أن هذه المادة يمكن التوصية بها للتطبيقات التي تكون فيها الخفة وكفاءة الطاقة أولوية، مما يمثل تقدمًا كبيرًا في تكييف ممارسات البناء مع المتطلبات البيئية المعاصرة.

الكلمات المفتاحية

خرسانة خفيفة الوزن ; البوليسترين الموسع ; نشارة الخشب؛ مواد مبتكرة؛ البناء المستدام. العزل الحراري.

Abstract

In the face of increasing challenges related to sustainability and energy efficiency in the construction sector, innovation in materials has become essential. Lightweight concrete, using alternative aggregates aggregates to natural ones such as expanded polystyrene and wood shavings, offers a promising solution. The literature review reveals significant potential for these materials to lighten structures while improving thermal and mechanical properties, justifying an in-depth exploration of their combined use.

This research is based on an experimental approach that combines the formulation of concrete mixes incorporating expanded polystyrene and treated wood shavings. In this study, treated wood shavings from woodworking waste, expanded polystyrene beads and the combination of the two materials were used by replacing natural sand for making sand concrete (SC) with different mixing ratio (0%, 10%, 20%, 30%, 40%, and50%) by volume of sand. The behavior of lightened sand concrete samples was then explored.

Tests were conducted to evaluate the mechanical, thermal, and physical properties of the samples in both fresh and hardened states. Statistical analyses were performed to validate the significance of the results and to optimize the formulations.

The results show that the integration of polystyrene and wood shavings into sand concrete significantly reduces the density of the material while maintaining satisfactory mechanical performance. Thermal tests indicate a notable improvement in insulation, with a reduction in thermal conductivity compared to traditional concrete. Additionally, the specific treatment of the wood shavings and polystyrene enhanced their compatibility with cement, thereby optimizing the cohesion of the final material.

This research demonstrates that the combined use of expanded polystyrene and wood shavings in lightweight concrete constitutes a viable innovation for sustainable construction. The results suggest that this material could be recommended for applications where lightness and energy efficiency are priorities, marking a significant advancement in adapting construction practices to contemporary environmental demands.

Keywords

Lightweight concrete; Expanded polystyrene; Wood shavings; Innovative material; Sustainable construction; Thermal insulation.

Résumé

Face aux défis croissants de durabilité et d'efficacité énergétique dans le secteur de la construction, l'innovation dans les matériaux est essentielle. Les bétons allégés, utilisant des granulats alternatifs aux granulats naturels comme le polystyrène expansé et les copeaux de bois, offrent une solution prometteuse. Une revue de la littérature révèle un potentiel significatif de ces matériaux pour alléger les structures tout en améliorant les propriétés thermiques et mécaniques, justifiant ainsi l'exploration approfondie de leur utilisation combinée.

Cette recherche repose sur une approche expérimentale combinant la formulation de mélanges de béton incorporant du polystyrène expansé et des copeaux de bois traités. Dans cette étude, des copeaux de bois traités issus de déchets de menuiserie, des billes de polystyrène expansé et la combinaison des deux matériaux ont été utilisés en remplacement du sable naturel pour la fabrication de béton de sable (SC) avec différents ratios de mélange (0%, 10%, 20%, 30%, 40% et 50%) en volume de sable. Le comportement d'échantillons de béton de sable allégé a ensuite été exploré.

Les résultats montrent que l'intégration du polystyrène et des copeaux de bois dans le béton de sable permet de réduire significativement la densité du matériau, tout en conservant des performances mécaniques satisfaisantes. Les essais thermiques indiquent une amélioration notable de l'isolation, avec une réduction de la conductivité thermique par rapport au béton traditionnel. De plus, le traitement spécifique des copeaux de bois et du polystyrène a permis d'améliorer leur compatibilité avec le ciment, optimisant ainsi la cohésion du matériau final.

Cette recherche démontre que l'utilisation combinée de polystyrène expansé et de copeaux de bois dans le béton allégé constitue une innovation viable pour la construction durable. Les résultats obtenus suggèrent que ce matériau pourrait être recommandé pour des applications où la légèreté et l'efficacité énergétique sont prioritaires, marquant un progrès significatif dans l'adaptation des pratiques de construction aux exigences environnementales contemporaines.

Mots clés

Béton allégé ; Polystyrène expansé ; Copeaux de bois ; Matériau innovant ; Construction durable ; Isolation thermique.

TABLE DES MATIERES

REMERCIMENTS 2
DEDICACE 3
ملخص 4
Abstract 5
Résumé 6
TABLE DES MATIERES 7
LISTE DES FIGURES 13
LISTE DES TABLEAUX 16
LISTE DES ABRÉVIATIONS 17
INTRODUCTION GENERALE 19
1. CHAPITRE 1 : BETONS DE SABLE 23
1.1. Introduction 24
1.2. Historique du béton de sable 24
1.3. Définition 26
1.4. Différence entre béton traditionnel, béton de sable et mortier 26
1.5. Domaines d'utilisation 26
1.5.1. Projection 26
1.5.2. Fondations profondes 27
1.5.3. Préfabrication 27
1.5.4. La construction routière 28
1.5.5. La réparation et la réhabilitation 28
1.6. Composition d'un béton de sable 29
1.6.1. Les sables 29
1.6.2. Les ciments 30
1.6.3. Les fillers 30
1.6.4. Les adjuvants 30
1.6.5. L'eau 30
1.6.6. Les gravillons 30
1.7. Avantages du béton de sable 31
1.8. Particularités d'un BS 31
1.8.1. Quantité de pâte 31
1.8.2. Quantité de gros granulats 32
1.8.3. Simple mise en place 32
1.8.4. Faible tendance à la ségrégation 32
1.8.5. Légèreté et résistance 33

1.9. Formulation d'un béton de sable 34
1.9.1. Approches théoriques 34
1.9.2. Méthode expérimentale de formulation 37
1.10. Résumé des différentes étapes de la formulation [3] 39
1.11. Caractéristiques du béton de sable de dunes à l'état frais 39
1.11.1. Maniabilité 39
1.11.2. Effet des fillers 39
1.11.3. Effet de la granulométrie du sable 40
1.11.4. Effet du rapport E/C 41
1.11.5. Compacité 41
1.11.6. Effet de la granulométrie du sable sur la compacité 41
1.11.7. Effet des ajouts de fines 42
1.12. Caractéristiques du béton de sable de dunes à l'état durci 42
1.12.1. Effet des fillers 42
1.12.2. Effet de la granulométrie du sable sur le comportement mécanique 43
1.13. Conclusion 44
2. CHAPITRE 2 : BETONS LEGERS 45
2.1. Introduction 46
2.2. Situation énergétique 46
2.3. La consommation de l'énergie en Algérie 46
2.4. Isolation thermique dans le bâtiment 49
2.5. Généralités sur les bétons légers 50
2.6. Historique des bétons légers 51
2.7. Définition du béton léger 52
2.8. Domaines d'utilisation 52
2.8.1. Structurellement 52
2.8.2. Ecologiquement 53
2.9. Granulats légers 53
2.10. Définition et classification des bétons légers 54
2.11. Evolution et Classification du Béton Léger : LWC à SLWC, ILC, ULWC et Warm béton 56
2.12. Utilisation des bétons légers 57
2.13. Exemples de construction en béton léger 58
2.13.1. Dans les bâtiments de grande hauteur[85] 58
2.13.2. Dans les ponts[85] 58
2.13.3. Dans la préfabrication 59
2.13.4. Applications du béton léger dans les structures marines[85] 59

2.14. Applications récentes du béton léger et du béton infraléger 60
2.15. Conception du mélange et production du béton léger 61
2.15.1. Les granulats 61
2.15.2. Les liants 62
2.15.3. Eau de gâchage et adjuvants 62
2.15.4. Conception du mélange (malaxage) 63
2.16. Méthode de malaxage 64
2.17. Agro-composites pour les bâtiments 64
2.18. Béton Léger à base de bille de polystyrène 65
2.19. Le polystyrène 65
2.20. Avantages du béton de polystyrène 66
2.21. Caractéristiques physiques et mécaniques du polystyrène 67
2.21.1. Densité 67
2.21.2. Propriétés morphologiques 67
2.21.3. Résistance à la compression du polystyrène 68
2.21.4. Conductivité thermique 68
2.22. Applications du béton de polystyrène 69
2.23. Caractéristiques physico-mécaniques des bétons de polystyrène 69
2.23.1. Effet de taille des billes de EPS 69
2.23.2. Effet du dosage en ciment (matrice cimentaire) 70
2.23.3. Effet des additions minérales 71
2.23.4. Densité du béton de EPS 72
2.23.5. Résistance à la compression 73
2.23.6. Résistance à la traction par fendage 73
2.23.7. Conductivité thermique 74
2.23.8. Absorption capillaire 75
2.23.9. Perméabilité 75
2.23.10. Résistance au feu 76
2.24. Recyclage et Traitement du EPS 76
2.25. Béton Léger à base de bois 79
2.26. Le bois 79
2.27. Microstructure du bois 79
2.28. Composition chimique du bois 80
2.28.1. La cellulose 80
2.28.2. L'hémicellulose 81
2.28.3. La lignine 81

2.29. Enjeux et intérêts des matériaux biosourcés 81
2.30. Avantages des bétons à base de bois 82
2.31. Propriétés des bétons de bois 83
2.31.1. Propriétés mécaniques 83
2.31.2. Propriétés hydriques 84
2.31.3. Propriétés thermiques 85
2.31.4. Durabilité des bétons végétaux 86
2.32. Les traitements possibles 87
2.33. Conclusion 88
3. CHAPITRE 3 : MATERIAUX ET ESSAIS 90
3.1. Introduction 91
3.2. Matériaux utilisés 91
3.2.1. Ciment 91
3.2.2. Sable 91
3.2.3. Fillers 91
3.2.4. Eau 92
3.2.5. Adjuvant 92
3.3. Polystyrène granulé 92
3.4. Copeaux de bois 93
3.5. Traitement des granulats légers 94
3.5.1. Importance du Traitement des EPS 94
3.5.2. Technique de traitement 94
3.6. Traitement des copeaux de bois 95
3.6.1. Technique de traitement 96
3.7. Formulation des échantillons 97
3.7.1. Formulation d'un béton de référence 97
3.7.2. Formulation des bétons allégés 98
3.8. Fabrication des échantillons 99
3.8.1. Protocole de malaxage 99
3.8.2. Mise en œuvre et conservation des éprouvettes 100
3.9. Essais réalisés à l'état frais 101
3.9.1. Maniabilité 101
3.9.2. Densité 101
3.10. Essais réalisés à l'état durcis 102
3.10.1. Masse volumique apparente 102
3.10.2. Résistance à la traction 102

3.10.3. Résistance à la compression 103
3.10.4. La porosité accessible à l'eau 104
3.10.5. Microstructure 105
3.10.6. La résistance au feu 105
3.10.7. Conductivité thermique 106
3.11. Conclusion 107
4. CHAPITRE 4 : RESULTATS ET DISCUSSION 108
4.1. Introduction 109
4.2. Effet de l'incorporations des WS sur le béton de sable 109
4.1.1. Maniabilité 109
4.2.1. Densité 110
4.2.2. Résistance mécanique 111
- Résistance à la compression 111
- Résistance à la flexion 113
4.2.3. Conductivité thermique 113
4.2.4. Porosité 115
4.2.5. Résistance au feu 116
4.2.6. Microstructure 117
4.3. Effet de l'incorporations des EPS sur le béton de sable 119
4.3.1. Effet du traitement du polystyrène 119
4.3.2. Maniabilité 119
4.3.3. Densité 120
4.3.4. Résistance mécanique 121
- Résistance à la compression 121
- Résistance à la traction 123
4.3.5. Porosité 124
4.3.6. Conductivité thermique 125
4.3.7. Résistance au feu 127
4.3.8. Microstructure 130
4.4. Effet de l'incorporations des WS et EPS sur le béton de sable 133
4.4.1. Maniabilité 133
4.4.2. Densité 133
4.4.3. Résistances Mécaniques 135
- Résistance à la compression 135
- Résistance à la traction 137
4.4.4. Conductivité thermique 138

4.4.5. Porosité 140
4.4.6. Résistance au feu 143
4.4.7. Microstructure 146
4.4.8. Impact du traitement du polystyrène expansé et des copeaux de bois 148
4.4.9. Conclusions 150
CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS 152
Références 155

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1-1 PHARE PORT SAÏD EGYPTE [3] 24
FIGURE 1-2 PANNEAU 3D EN BETON DE SABLE PROJET [8] 27
FIGURE 1-3 LA RELATION ENTRE LA QUANTITE DE CIMENT UTILISEE ET LE POURCENTAGE DE GRANULATS FINS DANS LE BETON [3]] 31
FIGURE 1-4 SCHEMA EXPLICATIF DE L'APPARENCE DU BS PUR, BS CHARGE ET DU BETON TRADITIONNEL [3] 32
FIGURE 1-5 INFLUENCE DU DIAMETRE D DU SABLE SUR LE DOSAGE EN FINES [3] 35
FIGURE 1-6 INFLUENCE DE LA DIMENSION D SUR LA POROSITE MINIMALE DU BETON POUR DEUX TAILLES D DE SABLE [3] 36
FIGURE 1-7 EFFET DES AJOUTS SUR LA MANIABILITE DU BETON DE SABLE [3] 40
FIGURE 1-8 EFFET DE LA GRANULOMETRIE DU SABLE [3] 40
FIGURE 1-9 EFFET DU RAPPORT E/C SUR LA MANIABILITE [3] 41
FIGURE 1-10 EFFET DU DOSAGE EN FINES SUR LA RESISTANCE EN COMPRESSION DU BETON DE SABLE DE DUNES [3] 42
FIGURE 1-11 EFFET DES FINES SUR LA RESISTANCE A LA COMPRESSION DU BETON DE SABLE [3] 43
FIGURE 2-1 STRUCTURE DE LA CONSOMMATION FINALE D'ENERGIE PAR SECTEUR D'ACTIVITE [42] 48
FIGURE 2-2 COMPARAISON ENTRE UNE CONSTRUCTION BIEN ISOLEE ET NON ISOLEE [44] 49
FIGURE 2-3 POSITIONNEMENT DES RUPTEURS THERMIQUES CONTINUS DANS UN BATIMENT ISOLE PAR L'INTERIEUR [43]ET ILLUSTRATION D'UN PONT THERMIQUE[44] 49
FIGURE 2-4 ORGANIGRAMME DES DIFFERENTS TYPES DE BETONS LEGERS[47] 50
FIGURE 2-5 TYPES DE BETONS LEGERS UTILISES DANS L'INDUSTRIE DE LA CONSTRUCTION (REPRODUIT D'APRES ZAREEF) [48] 51
FIGURE 2-6 REPRESENTATION SCHEMATIQUE DES DIFFERENTS TYPES DE BETON LEGER [20] 55
FIGURE 2-7 CORRELATION ENTRE LES CLASSES DE RESISTANCE ET LA DENSITE SECHE NECESSAIRE POUR LE BETON LEGER [69] 56
FIGURE 2-8 UTILISATIONS DES BETONS LEGERS 57
FIGURE 2-9 A) PARK REGIS, 1967, SYDNEY, AUSTRALIA. B) LAKE POINT TOWER, 1968, CHICAGO, USA. C) GUY'S HOSPITAL, 1971, LONDON, UNITED KINGDOM [85] 58
FIGURE 2-10 DETAILS OF BRIDGE OVER RIVER SINIGO AT AVELENGO, ITALY [85] 59
FIGURE 2-11 BATIMENT DE LA STANDARD BANK DE JOHANNESBURG PENDANT ET APRES LA CONSTRUCTION [85] 59
FIGURE 2-12 NAVIRE EN BETON DE LA SECONDE GUERRE MONDIALE PASSANT SOUS LE PONT SAN FRANCISCO-OAKLAND BAY, SAN FRANCISCO [85] 60
FIGURE 2-13 FORMATION SEVERE DE MICROFISSURES DANS LA MATRICE D'UN BETON LEGER A HAUTE RESISTANCE DUE A L'ABSORPTION D'EAU DES GRANULATS LEGERS FINS ET GROSSIER [99] 63
FIGURE 2-14 POLYMERISATION DU STYRENE [10] 65
FIGURE 2-15 TROIS FORMES IMPORTANTES D'EPS. LES PERLES FORMEES PAR EXPANSION DE LA RESINE SONT MOULEES DANS LA FORME SOUHAITEE 66
FIGURE 2-16 L'APPARENCE MICROSCOPIQUE DE L'EPS (A)×20000 ; (B)×2000 ; (C)×500 [114] 67
FIGURE 2-17 EFFET DE TAILLE SUR LA RESISTANCE EN COMPRESSION DU BETON LEGER DE POLYSTYRENE EXPANSE [123] 70
FIGURE 2-18 EVOLUTION DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION EN FONCTION DU RAPPORT POLYSTYRENE/SABLE POUR LES DIFFERENTES QUANTITES DU CIMENT [125] 71
FIGURE 2-19 MICROSTRUCTURE DU BOIS [151] 80
FIGURE 2-20 COURBE D'ADSORPTION-DESORPTION DES COMPOSITES ARGILE-CIMENT-BOIS [166] 85
FIGURE 2-21 CONDUCTIVITE THERMIQUE DU BETON DE CHANVRE EN FONCTION DE LA FRACTION VOLUMIQUE DES PARTICULES DE CHANVRE [173] 86
FIGURE 3-1 ANALYSE PAR DIFFRACTION DES RAYONS X DE (A) CIMENT (B) SABLE 92
FIGURE 3-2 IMAGES MEB DE LA STRUCTURE D'UNE BILLE DE POLYSTYRENE 93
FIGURE 3-3 COPEAUX DE BOIS A) NON TRAITES B) TRAITES 93
FIGURE 3-4 TECHNIQUE DE TRAITEMENT DES BILLES DE POLYSTYRENE GRANULE 95
FIGURE 3-5 BILLES DE EPS A) NON TRAITEES B) TRAITEES 95
FIGURE 3-6 ANALYSE PAR DIFFRACTION DES RAYONS X DES COPEAUX DE BOIS 97
FIGURE 3-7 MANIABILIMETRE LCL A MORTIER 101
FIGURE 3-8 MESURE DE LA MASSE 102
FIGURE 3-9 DISPOSITIF DE L'ESSAI DE TRACTION PAR FLEXION 103
FIGURE 3-10 DISPOSITIF DE L'ESSAI DE COMPRESSION 103
FIGURE 3-11 DISPOSITIFS UTILISES POUR L'ESSAI D'ACCESSIBILITE A L'EAU 104
FIGURE 3-12 MICROSCOPE ELECTRONIQUE A BALAYAGE (MEB) ET ECHANTILLONS 105

FIGURE 3-13 LE FOUR A MOUFLE 106
FIGURE 3-14 DISPOSITIF POUR L'ESSAI DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE 107
FIGURE 4-1 MANIABILITE POUR LES BETONS DE WS 110
FIGURE 4-2 DENSITE DU BETON DE WS A DIFFERENTS AGES 111
FIGURE 4-3 RESISTANCE A LA COMPRESSION DES BETONS DE WS 112
FIGURE 4-4 VARIATION DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION A 28 JOURS ET DE LA POROSITE (E) DU BETON EN FONCTION DES COPEAUX DE BOIS (WS) 112
FIGURE 4-5 LA RESISTANCE A LA FLEXION DES SCWS 113
FIGURE 4-6 VARIATION DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE, DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION (28 JOURS) ET DE LA POROSITE DU BETON SELON LE TAUX WS 114
FIGURE 4-7 CORRELATION ENTRE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE DU BETON EN FONCTION DE LA DENSITE DU BETON SCWS 114
FIGURE 4-8 CONDUCTIVITE THERMIQUE DU BETON EN FONCTION DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION DU BETON 115
FIGURE 4-9 LA POROSITE DU BETON SCWS 115
FIGURE 4-10 RESISTANCE A LA COMPRESSION APRES EXPOSITION A DIFFERENTES TEMPERATURES 116
FIGURE 4-11 RESISTANCE A LA FLEXION APRES EXPOSITION A DIFFERENTES TEMPERATURES 116
FIGURE 4-12 PERTE DE MASSE DU BETON DUE A LA TEMPERATURE ELEVEE 116
FIGURE 4-13 VISUALISATION DE LA RUGOSITE DE SURFACE (A) ET DE LA STRUCTURE POREUSE DES COPEAUX DE BOIS (B)ET(C) 117
FIGURE 4-14 VISUALISATION DE LA RUGOSITE DE SURFACE (A) ET DE LA STRUCTURE POREUSE DES COPEAUX DE BOIS (B)ET(C)C 117
FIGURE 4-15 VISUALISATION DE LA ZONE DE TRANSITION D'INTERFACE ENTRE TWS ET LA MATRICE CIMENTAIRE 118
FIGURE 4-16 ETAT DES EPROUVETTES A) APRES ET B) AVANT TRAITEMENT DES BILLES DE EPS 119
FIGURE 4-17 OUVRABILITE DES BETONS DE EPS 120
FIGURE 4-18 DENSITE DES BETONS DE EPS 120
FIGURE 4-19 CORRELATION ENTRE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION ET LA DENSITE DES BETONS DE EPS 121
FIGURE 4-20 RESISTANCE A LA COMPRESSION A 28JOURS DES BETONS EPS 122
FIGURE 4-21 VARIATION DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION ET LA POROSITE SELON LE TAUX DE EPS 123
FIGURE 4-22 RESISTANCE A LA FLEXION DES BETONS SCEPS 124
FIGURE 4-23 LA POROSITE DES BETONS DE EPS 125
FIGURE 4-24 LA CONDUCTIVITE THERMIQUE DES BETONS SCEPS 125
FIGURE 4-25 VARIATION DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE, DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION (28 JOURS) ET DE LA POROSITE DU BETON SELON LE CONTENU EPS 126
FIGURE 4-26 CORRELATION ENTRE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE ET LA DENSITE POUR SCEPS 126
FIGURE 4-27 RESISTANCE A LA COMPRESSION DES SCEPS APRES EXPOSITION A DIFFERENTES TEMPERATURES 127
FIGURE 4-28 RESISTANCE A LA FLEXION DES BETONS SCEPS APRES EXPOSITION A DIFFERENTES TEMPERATURES 127
FIGURE 4-29 DES ECHANTILLONS DE BETONS SCEPS50 APRES EXPOSITION AU FEU 128
FIGURE 4-30 IMAGES MEB D'ECHANTILLONS DE SCEPS EXPOSE A DIFFERENTES TEMPERATURES 129
FIGURE 4-31 IMAGES MEB DE LA MORPHOLOGIE DES BILLES D'EPS A) AVANT ET B) APRES TRAITEMENT 131
FIGURE 4-32 IMAGE MEB D'VUE D'ENSEMBLE D'UNE BILLE DE EPS TRAITEE DECOUPEE ENCAPSULEE DANS LA MATRICE CIMENTAIRE 132
FIGURE 4-33 VARIATION DU TEMPS D'ECOULEMENT DU BETON DE EPS+WS 133
FIGURE 4-34 DENSITE DU BETON EPS+WS 134
FIGURE 4-35 COMPARAISON DE LA DENSITE DES BETON EPS, WS, ET EPS+WS 135
FIGURE 4-36 LA RESISTANCE A LA COMPRESSION POUR LE BETON EPS+WS 135
FIGURE 4-37 CORRELATION ENTRE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION ET LA DENSITE POUR LE BETON EPS+WS 136
FIGURE 4-38 COMPARAISON DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION DES BETON EPS, WS, ET EPS+WS 136
FIGURE 4-39 COMPARAISON DE LA RESISTANCE A LA FLEXION DES BETON EPS, WS, ET EPS+WS 138
FIGURE 4-40 LA CONDUCTIVITE THERMIQUE DES BETONS A BASE DE EPS+WS 138
FIGURE 4-41 VARIATION DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE, DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION (28 JOURS) ET DE LA POROSITE DU BETON SELON LE TAUX DE EPS+WS 139
FIGURE 4-42 COMPARAISON DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE DES BETON EPS, WS, ET EPS+WS 140
FIGURE 4-43 L'EVOLUTION DE LA POROSITE EN FONCTION DE LA QUANTITE DE (EPS+WS) 141
FIGURE 4-44 L'EVOLUTION DE LA POROSITE ET DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE EN FONCTION DU POURCENTAGE DE EPS+WS 142
FIGURE 4-45 COMPARAISON DE LA POROSITE DES BETON EPS, WS, ET EPS+WS 143
FIGURE 4-46 RESISTANCE A LA COMPRESSION APRES EXPOSITION A DIFFERENTES TEMPERATURES 144

FIGURE 4-47 RESISTANCE A LA FLEXION APRES EXPOSITION A DIFFERENTES TEMPERATURES..... 145
FIGURE 4-48 IMAGES MEB D'UN ECHANTILLON DE BETON CONTENANT EPS+WS APRES EXPOSITION A 400°C..... 146
FIGURE 4-49 LA DISTRIBUTION DES GRANULATS LEGERS (EPS+WS) DANS LA MATRICE DU BETON..... 147

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 2-1 CONSOMMATION FINALE D'ENERGIE PAR SECTEUR D'ACTIVITE [41] 47
TABLEAU 2-2 LES EXIGENCES EN MATIERE DE RESISTANCE A LA COMPRESSION ET DE RESISTANCE A LA TRACTION PAR FENDAGE POUR LES (LWA) [62] 54
TABLEAU 2-3 TABLEAU REPRESENTANT UN RESUME DE QUELQUES-UNES DE CES CONSTRUCTIONS RECENTES REMARQUABLES 60
TABLEAU 2-4 VALEURS DE LA RESISTANCE EN COMPRESSION DU PSE EN FONCTION DE SA DENSITE [112] 68
TABLEAU 2-5 DENSITE DES BETONS DE EPS [128] 72
TABLEAU 2-6 ETUDES ANTERIEURES SUR LE BETON LEGER EN EPS [147] 78
TABLEAU 2-7 COMPOSANTS CHIMIQUES DU BOIS, LEUR NATURE POLYMERIQUE ET LEURS FONCTIONS [151] 80
TABLEAU 2-8 QUELQUES PROPRIETES MECANIQUES DES BETONS VEGETAUX : RESISTANCES EN COMPRESSION [164] 84
TABLEAU 3-1 CARACTERISTIQUES DU EPS UTILISE 93
TABLEAU 4-1 COMPARAISON DE LA DENSITE DES BETON EPS, WS, ET EPS+WS 137
TABLEAU 4-2 COMPARAISON DES PROPRIETES DES BETONS LEGERS (EPS ET WS) TRAITES ET NON TRAITES AVEC LES RESULTATS DE LA LITTERATURE 148

LISTE DES ABRÉVIATIONS

BO	Béton ordinaire
BS	Béton de sable
C	Masse de ciment
CEBTP	Centre Expérimentale de Recherches et d'Études
CL	Filler calcaire
CNERIB	Centre National d'Études et de Recherches Intégrées du Bâtiment (en Algérie)
CPJ-CEM II	Ciment Portland Composé
CWA	Absorption capillaire d'eau
d	La dimension du plus petit grain de l′étendue granulaire
$\mathbf{D_{max}}$	Le diamètre maximal des grains de sable
DRX	diffractométrie aux rayons X
DS	Sable de dune
E	Module d'élasticité statique (MPa)
E	Masse d'eau
E.S.V	Équivalent de sable à vue
E/C	Rapport massique de l'eau sur ciment
ENPA	École Nationale Polytechnique (en Algérie)
EPS	polystyrène expansé
EPSWS	Béton de polystyrène expansé et copeaux de bois
FS	Fumée de Silice
G/S	Rapport massique de gravillon sur sable
GR	Granulats recyclés
GRG	Granulats recyclés grossier
HR	Humidité Relative (%)

ITZ	Zone de transition interfaciale
LA	Granulats légers
LWC	Béton léger
MEB	Microscope électronique à balayage
NA	Granulats naturels
Rc	Résistance en compression (MPa)
Rf	Résistance à la flexion ;
Rt	Résistance à la traction
SC	Béton de sable
SCEPS	Béton de sable avec polystyrène expansé
SCWS	Béton de sable avec copeaux de bois
SP	Superplastifiant
UV	Rayons ultra violets
WS	Copeaux de bois
ε (%)	Porosité totale à l'eau (%)
ρ	Densité du constituant exprimée en g/cm 3
σ_c	Résistance d'adhérence au cisaillement
σ_{fe}	Résistance d'adhérence au fendage
σ_{fl}	Résistance d'adhérence à la flexion

INTRODUCTION GENERALE

Le développement de nouveaux matériaux de construction s'inscrit dans une démarche d'innovation visant à répondre aux défis actuels de l'industrie du bâtiment. L'objectif est de créer des solutions plus durables, efficaces, et respectueuses de l'environnement. Dans cette optique, cette thèse porte sur l'élaboration d'un matériau de construction innovant allégé, obtenu par l'incorporation de polystyrène et de copeaux de bois dans une matrice de béton de sable. L'idée d'innovation ici est centrée sur l'utilisation de matériaux recyclés ou naturels pour alléger le béton tout en maintenant, voire en améliorant, ses propriétés mécaniques et physiques. Le terme "allégé" fait référence à la réduction de la densité du béton par l'ajout de matériaux moins denses, comme le polystyrène expansé (EPS) et les copeaux de bois. Le "polystyrène", un polymère synthétique souvent utilisé dans les emballages, présente des caractéristiques intéressantes pour l'allègement des bétons en raison de sa faible densité et de ses bonnes propriétés thermiques. Quant aux "copeaux de bois", résidus issus de l'industrie du bois, ils offrent non seulement une alternative durable pour le renforcement du béton, mais participent également à la valorisation des déchets de bois. Ensemble, ces matériaux contribuent à la création d'un béton allégé, qui vise à allier performance, légèreté, et durabilité.

Historiquement, le béton est l'un des matériaux de construction les plus utilisés dans le monde, mais son impact environnemental, notamment en termes de consommation de ressources naturelles, est une préoccupation majeure. Depuis plusieurs décennies, les chercheurs et les industriels explorent des moyens d'améliorer l'efficacité des bétons, que ce soit par l'utilisation de nouveaux liants, de fibres, ou d'additifs permettant de modifier la structure du béton. Le développement des bétons allégés s'inscrit dans cette quête d'amélioration continue. Les bétons allégés, qui se caractérisent par une réduction de la densité grâce à l'incorporation de matériaux tels que les granulats légers, ont fait l'objet de nombreuses études. Cependant, l'intégration de matériaux recyclés comme le polystyrène et naturels comme les copeaux de bois dans les bétons allégés est encore un domaine en plein développement, avec des défis techniques à relever concernant la compatibilité des matériaux, leur traitement, et leurs effets sur les propriétés du béton.

Cette thèse répond à plusieurs enjeux cruciaux dans le domaine de la construction durable. D’une part, elle vise à réduire la densité du béton tout en maintenant une résistance mécanique suffisante pour une utilisation structurelle. D’autre part, elle explore l’intégration de matériaux

recyclés et naturels, contribuant ainsi à la valorisation des déchets industriels et à la réduction de l'impact environnemental des matériaux de construction. Les principales limites de cette recherche concernent la variabilité des propriétés des copeaux de bois et du polystyrène en fonction de leur origine et de leur traitement. Cette variabilité s'explique, d'une part, par la différence de nature entre ces deux matériaux : le polystyrène étant un polymère synthétique, tandis que le bois est un matériau lignocellulosique d'origine naturelle. D'autre part, les procédés de fabrication, de transformation et de recyclage influencent leurs caractéristiques physiques et mécaniques, ce qui pose des défis quant à leur compatibilité avec la matrice de béton de sable. Les hypothèses principales posées sont que l'intégration de polystyrène et de copeaux de bois dans le béton de sable permet de réduire significativement la densité du matériau tout en maintenant des performances mécaniques adéquates et que les traitements appliqués aux copeaux de bois et au polystyrène amélioreront leur compatibilité avec la matrice cimentaire.

Pour répondre aux questions posées par cette recherche, plusieurs méthodes seront mises en œuvre. Tout d'abord, une revue bibliographique exhaustive sera menée pour identifier les connaissances actuelles sur les bétons de sable, les bétons allégés, et les matériaux de remplissage tels que le polystyrène et les copeaux de bois. Ensuite, Pour évaluer la pertinence de cette approche, différents essais ont été réalisés, portant sur la maniabilité, la densité, la résistance à la compression et à la traction, la porosité, la conductivité thermique, la résistance au feu, ainsi que l'étude de la microstructure du matériau. Ces tests permettent de valider l'efficacité du béton allégé proposé en termes de performances mécaniques et de durabilité, ouvrant ainsi la voie à de nouvelles applications dans le secteur de la construction. Les matériaux seront soumis à différents traitements, notamment un traitement innovant du polystyrène, pour améliorer leur performance au sein du mélange de béton. Enfin, les résultats obtenus seront analysés et discutés en vue de formuler des recommandations pour l'application de ces nouveaux matériaux dans la construction.

L'importance de cette thèse réside dans son potentiel à contribuer à la fois à la durabilité et à l'innovation dans le domaine des matériaux de construction. En développant un béton allégé utilisant des matériaux recyclés et naturels, cette recherche pourrait offrir une alternative écologique et économique aux bétons traditionnels, tout en répondant aux exigences de la construction moderne en termes de performance et de durabilité. L'objectif principal est donc de formuler, tester et valider un matériau de construction innovant qui combine légèreté, résistance, et durabilité, tout en réduisant l'impact environnemental.

Cette thèse est structurée en cinq chapitres principaux. Le premier chapitre présente une recherche bibliographique sur le béton de sable, afin de poser les bases théoriques de l'étude. Un historique du béton de sable est d'abord abordé, ainsi que ses domaines d'utilisation et ses avantages. Les méthodes de formulation des bétons de sable sont ensuite détaillées, suivies d'une analyse des propriétés à l'état frais et durci.

Le deuxième chapitre se concentre sur une revue des bétons allégés, explorant les différentes techniques et matériaux utilisés pour alléger le béton. Il commence par une analyse du contexte énergétique en Algérie, soulignant l'importance de l'isolation thermique. Ensuite, les bétons légers sont présentés, incluant leurs domaines d'application et des exemples concrets. Le processus de conception et de production des bétons légers est également détaillé. Après, l'accent sera mis sur les bétons légers intégrant du polystyrène et des copeaux de bois, mettant en lumière les avancées et les défis actuels dans ce domaine. Cette partie explore les bétons légers à base de billes de polystyrène les bétons légers à base de bois, en détaillant les caractéristiques, les avantages, les propriétés physiques et mécaniques du polystyrène et du bois, ainsi que leurs applications et les effets des différents paramètres sur leurs performances. Le recyclage et le traitement de ces deux produits seront également abordés.

Le troisième chapitre décrit les matériaux utilisés et les essais réalisés, en détaillant les protocoles expérimentaux adoptés. Il aborde les matériaux utilisés dans la formulation des bétons allégés, le traitement des granulats légers, les techniques spécifiques pour le polystyrène et les copeaux de bois, et la formulation des échantillons, incluant la fabrication, le protocole de malaxage et la conservation des éprouvettes. Enfin, les essais réalisés à l'état frais (maniabilité, densité) et à l'état durci (résistance, porosité, microstructure, résistance au feu, conductivité thermique) sont présentés.

Le quatrième chapitre présente une discussion approfondie des résultats obtenus, structurée en trois axes : les effets du polystyrène sur le béton de sable, les effets des copeaux de bois, et les effets combinés de ces deux matériaux. Chaque section se conclut par des conclusions et des perspectives pour des recherches futures. Cette organisation vise à fournir une analyse complète et structurée du sujet, en répondant aux questions posées tout au long de la recherche.

Le manuscrit sera clôturé par une conclusion générale synthétisant les résultats principaux obtenus dans le présent travail et des perspectives envisagées pour les travaux futurs.

Ainsi, cette thèse vise à ouvrir de nouvelles perspectives dans le domaine des matériaux de construction, en proposant des solutions innovantes pour un avenir plus durable.

1. CHAPITRE 1 : BETONS DE SABLE

1.1. Introduction

La rareté des granulats en particulier, au sud de l'Algérie et le cout élevé de transport a créé un intérêt croissant pour l'emploi du béton de sable [1]. En effet, il présente plusieurs avantages dans le domaine de construction, tels, l'utilisation des ressources naturelles comme le sable, une granularité réduite, une absence de ségrégation et une surface lisse après décoffrage.

De plus, les recherches antérieurs montrent la possibilité d'obtenir avec un dosage important de ciment ainsi qu'avec l'utilisation de fines d'addition telle la fumée de silice, des résistances supérieures à 50 MPa, ce qui fait de lui un béton de haute performance [2].

Ce chapitre explore en profondeur l'histoire, la composition, les méthodes de formulation et les applications pratiques du béton de sable, mettant en lumière ses propriétés distinctives et son rôle crucial dans le secteur de la construction moderne.

1.2. Historique du béton de sable

Le béton de sable étant une ancienne technologie utilisée dans plusieurs pays, fit ses premières apparitions dans « le béton aggloméré » en France, par F. Coignet au XIX siècle. Il était constitué de sable, de ciment, de chaux et d'eau [3]. A l'époque, plusieurs applications de ce matériau ont été réalisées et demeurent en service jusqu'à nos jours comme : le phare de Port-Saïd (Figure 1-1) [4] en Egypte mis en service en 1869 [3].



Figure 1-1 phare port Saïd Egypte [3]

Le béton de sable a trouvé son application en ex-URSS dans le port de Kaliningrad ainsi que le pont de Chernavskif à Voroney au début du XX siècle [5].

Vers la fin de la seconde guerre mondiale, Les études menées par le professeur Rebinder sur le BS ont indiqué la possibilité de l'application de ce béton dans plusieurs domaines (pistes d'aviation, chaussées, mur architecturaux, etc...). Néanmoins, l'utilisation des gros granulats dans la formulation des bétons a conduit à une augmentation de leurs performances mécaniques. Ce qui a mené à la négligence du BS [6].

Par la suite, l'épuisement progressif des ressources en gros granulats a régénéré les recherches sur le BS. En 1986, la diversité et les avantages des résultats trouvés a mené les chercheurs du Centre Expérimental de recherches et Etudes du Bâtiment et Travaux publics (CEBTP) à établir une synthèse sur le béton de sable hyper- compacté. La même année, le Laboratoire Central des Ponts et chaussées (LCPC) et la compagnie CEBTP ont réalisé une autre synthèse de connaissances sur le BS[3].

Le projet national SABLOCRETE, lancé en 1988 en France dans le cadre du programme MATERLOC, visait à optimiser l'utilisation des matériaux locaux dans le génie civil et le bâtiment. Face à l'épuisement progressif des ressources en gros granulats, il s'est concentré sur la valorisation des sables naturels ou de concassage, souvent sous-exploités, pour la réalisation de bétons où ils deviendraient le constituant principal. Dans cette optique, un programme de recherche et de développement dédié à l'utilisation du béton de sable (BS) a été confié à l'association SABLOCRETE, avec le soutien financier du ministère de l'Équipement (France). Les travaux menés dans le cadre de ce projet ont mis en évidence des propriétés spécifiques des bétons de sable, offrant des solutions adaptées à des problématiques parfois mal résolues par le béton traditionnel. Ces résultats ont été publiés en 1994 dans l'ouvrage Bétons de sable : caractéristiques et pratiques d'utilisation, soulignant ainsi la place à part entière du béton de sable dans la gamme des bétons.[3].

Depuis lors, des laboratoires et entreprises dans plusieurs pays dont L'Algérie, ont entamé des programmes de recherches sur ce matériau (Pr Bederina, U-Laghouat ; Pr Benmalek, U-Guelma ; Pr Benaissa, UST-Oran…...).

Le CNERIB a été le premier à avoir entamé une gamme de travaux de recherche pour la valorisation de ce matériau.

1.3. Définition

Le béton de sable est un matériau constitué de ciment, sable, eau, fillers et adjuvant réducteurs d'eau. Dans certains cas, il peut contenir des gravillons tant que le rapport massique G/S reste inférieur à 0,7 (G = gravillon ; S = sable) pour répondre à des usages particuliers. Il s'agit dans ce cas d'un béton de sable chargé[7].

1.4. Différence entre béton traditionnel, béton de sable et mortier

Bien que le béton de sable comporte des similarités avec le mortier et le béton traditionnel. Il diffère de ces matériaux dans plus d'un point.

D'une part, il se distingue du béton traditionnel par son fort dosage en sable et par l'absence ou le faible dosage de gravillon, ainsi que le besoin de l'incorporation d'additions.

D'autre part, ce béton se distingue du mortier par : un dosage réduit en liant, une résistance plus élevée ainsi que son domaine d'application (généralement destiné aux usages du béton traditionnel).

1.5. Domaines d'utilisation

Le béton de sable et par sa composition constituée essentiellement de petits granulats, lui permet une utilisation plus vaste qu'un béton ordinaire à savoir, les routes, le domaine du bâtiment, ainsi que les bétons projetés.

1.5.1. Projection

Selon la littérature, les bétons de sable ont montré des propriétés intéressantes leurs permettant d'être appliqués dans le domaine de projection. En effet, selon Benaissa[8], un béton de sable projeté en substitution d'un béton ordinaire présente l'avantage d'être dosé avec une quantité importante en calcaire avec une faible quantité de ciment. Le rendant ainsi plus écologique et plus économique.

1.5.2. Fondations profondes

Les bétons préconisés pour les travaux souterrains telles les fondations profondes doivent répondre à certaines recommandations du LCPC [9]

- Fluidité et mise en place sans vibration ;
- Résistance à la ségrégation et au délavage ;
- Prise lente et contrôlée ;
- Compacité élevée ;
- Bonnes performances mécaniques.

Considérons les caractéristiques du béton de sable, à savoir sa cohésion, son homogénéité et sa fluidité apportée par les adjuvants fluidifiants. Il prend largement sa place dans la construction des fondations profondes et reprises en sous-œuvre et des travaux souterrains[10].

1.5.3. Préfabrication

Le béton de sable se prête aussi aux travaux de préfabrication dans le domaine du bâtiment. Et ce, par le fait de sa fine granulométrie qui lui facilite l'accessibilité aux cotes minimales des pièces préfabriquées de formes complexes ou dans le cas de ferraillages denses [11] (Figure1-2) [8].



Figure 1-2 Panneau 3D en béton de sable projet [8]

Des recherches menées par Bouziani et al [12] et Benaissa et al [13]sur la valorisation des sables locaux (sables alluvionnaire et de dunes de la région de Laghouat au sud de l'Algérie)

dans la préfabrication des blocs en béton ont permis d'élaborer des blocs en BS plus légers par rapport aux bétons traditionnels tout en ayant des résistances mécaniques comparables [12] .

1.5.4. La construction routière

Il est bien connu que trois quarts du territoire de l'Algérie sont occupés par le désert du Sahara, ce qui a poussé les chercheurs à considérer l'utilisation du sable de dune dans plusieurs domaines de construction. En effet, les recherches actuelles se penchent vers l'adaptation de la technologie ainsi que la construction routière précisément, à l'utilisation des matériaux locaux, en particulier le sable de dune.

En réalité, l'utilisation du béton de sable est similaire à celle du béton traditionnel. Par conséquent, l'usage du béton de sable compacté en corps de chaussée représente un intérêt environnemental et économique à travers la diminution des dépôts gênants de sable de dunes en utilisant ce dernier comme composant principal du béton de sable [14].

Ce type de béton est un béton de sable avec une teneur en ciment entre 250 et 330 kg/m3, compacté, afin de former une couche de base dans la structure des chaussées. L'étude menée par Khelaifa [14, 15] sur le béton de sable compacté avec ajout de granulats de caoutchouc montre des résultats satisfaisants en terme de résistance à la compression et affirme que ce type de béton peut être classé en classe 1 d'après la norme française NF P 98-170 [16] relative aux bétons routiers.

1.5.5. La réparation et la réhabilitation

Etant donné les multiples propriétés du béton de sable à savoir, son absence de gros granulats, son faible module d'élasticité, son homogénéité sa porométrie fine ainsi que sa bonne adhérence aux supports. Le béton de sable est considéré selon les chercheurs comme étant un matériau à caractère peu fissurant [17]. D'où l'intérêt de son application dans la réparation et la rénovation d'une multitude d'ouvrages tels :

- La réhabilitation structurante d'un collecteur encombré Agrippa d'Aubigné de la ville de Paris [3].
- Réhabilitation des silos à grains à Moscou : travaux de rénovation avec ferraillage de surface et une couche de béton de sable en 6 cm d'épaisseur [9].
- Réhabilitation d'une buse métallique : RN 89, ARTIGUES près de bordeaux [3]

1.6. Composition d'un béton de sable

D'une manière générale, le béton de sable est défini comme un béton fin, selon la norme NF P 18-500 [18], composé principalement de sable, de ciment, d'additifs, d'eau et d'auxiliaires éventuels, ne contenant aucun granulat grossier ou n'en contenant qu'un seul. Le rapport de masse (gravier/sable) est inférieur à 0,7. Le béton ordinaire à granulats de gros diamètre, jusqu'à 25 mm, avec un dosage en ciment compris entre 250 et 400 kg/m3, nécessite un rapport G/S de l'ordre de 2 à 2,2 pour des raisons d'ouvrabilité [19], donc Seul le ciment peut assurer la compacité maximale du béton sans l'apparition d'autres particules fines. Contrairement au béton ordinaire, le béton de sable est connu pour ne pas contenir de gros granulats, ce qui le rend poreux, et pour assurer un compactage maximal, il est nécessaire d'augmenter la quantité de poudre fine (ciment). Ceci conduit à l'expression empirique suivante reproduite par Chauvin et Grimaldi[20], qui donne la proportion de ciment dans le mélange en fonction de la taille Total nominal. Ainsi, plus la taille des agrégats est petite, plus la quantité de matériau est grande Un degré élevé de cimentation est requis dans le mélange.

Techniquement, il est déconseillé d'utiliser une grande quantité de matériau cimentaire, car cela pose des problèmes de retrait, et économiquement, le matériau en béton obtenu n'est pas adapté. Afin de résoudre le problème de porosité du béton de sable, en particulier du béton de sable de dune, des charges doivent être utilisées tout en maintenant le niveau de ciment du béton ordinaire. Le rôle du filler est de combler les vides entre les grains de sable et de durcir le mélange sable-filler avec du coulis de ciment. Ainsi, l'expression précédente donne la quantité de (ciment + poudre fine)

1.6.1. Les sables

Il s'agit de tous les sables conformes aux définitions des normes NF P 18-301[21]et NF P 18-101[22]. Aucune restriction n'existe concernant l'origine du sable utilisé, qu'il s'agisse d'un sable de dunes, de concassage ou alluvionnaire. Le seul critère exigible pour la réalisation d'un béton de sable réside dans la propreté des sables [3].

1.6.2. Les ciments

Les ciments utilisés pour la confection des bétons de sable doivent être conformes à la norme NF P15-301[23]. Le dosage en ciment doit être proche pour les bétons traditionnels (300-400 kg/m3) [6].

1.6.3. Les fillers

Dans le cas des bétons de sable, l'étendue granulaire est bornée supérieurement à 5 mm par l'absence de gros granulats. Il parait alors évident qu'un mélange ciment-sable présentera une porosité plus élevée que la porosité d'un béton traditionnel [24].

D'où la nécessité d'un ajout (filler) pour combler une partie des vides de sable, et on assure ensuite la rigidité du mélange par un complément en ciment correspondant aux dosages habituellement employés pour les bétons traditionnels[3].

1.6.4. Les adjuvants

Pour les bétons de sable, l'usage des adjuvants à savoir les plastifiants ou les superplastifiants est privilégié. Ils améliorent la maniabilité est augmentent la résistance.

Les superplastifiants sont souvent utilisés dans les bétons de sable car ils augmentent considérablement l'ouvrabilité des bétons[25].

1.6.5. L'eau

Le béton de sable nécessite beaucoup d'eau en raison de sa surface spécifique élevée due à sa forte proportion d'éléments fins. Le rapport eau/ciment (E/C) est plus élevé que le béton ordinaire, des adjuvants sont donc nécessaires. L'eau utilisée pour fabriquer le béton de sable doit répondre à la norme NF P 18-303[26].

1.6.6. Les gravillons

Certaines propriétés (fluage, retrait, résistance, maniabilité) peuvent être considérablement améliorées en ajoutant de petites quantités de gravier.

En effet, tant que le rapport massique gravier/sable (G/S) reste inférieur à 0,70, on peut supposer qu'il s'agit de béton de sable[47].

Il s'agit alors d'un béton chargé de sable : cette notion implique qu'il existe une forte discontinuité entre le plus grand diamètre D1 0/D1 du sable et le plus petit diamètre d2 d2/D2 du gravier.

1.7. Avantages du béton de sable

- Réduire le cout de construction par l'exploitation des quantités considérables de sable de notre Sahara.
- Jointoiement du sol et fondations profondes pour la construction[3]
- Un fini de surface de bonne qualité[8]

1.8. Particularités d'un BS

1.8.1. Quantité de pâte

Le béton de sable se différencie du béton ordinaire par un fort dosage de sable et de pate, contrairement à la quantité de gravillons. Car à mesure que le diamètre maximal du granulat diminue, la quantité de ciment devient relativement importante. La (Figure 1-3) [3] montre la relation entre la quantité de ciment utilisée et le pourcentage de granulats fins dans le béton.

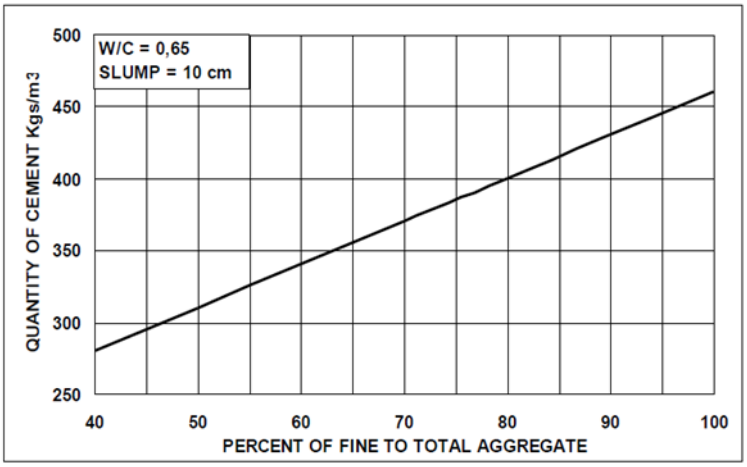


Figure 1-3 la relation entre la quantité de ciment utilisée et le pourcentage de granulats fins dans le béton [3]]

Afin d'éviter une consommation excessive de ciment, il est nécessaire d'ajouter une granulométrie proche de celle du ciment. Les éléments fins jouent un rôle important dans la rhéologie des pâtes de ciment. Des études ont montré qu'au-delà d'un certain niveau, La poudre fine agit comme un lubrifiant, ce qui est particulièrement important après un broyage fin [27]. Par conséquent, l'ajout d'addition peut réduire le coût du béton et augmenter considérablement sa compacité. Pour le BS un dosage entre 70 et 220Kg/m3 ou plus est nécessaire. De ce fait, le

type et la finesse de l'addition doit être choisi soigneusement, car elle influera grandement sur les caractéristiques du BS.

1.8.2. Quantité de gros granulats

La particularité d'un béton de sable se situe dans sa granularité. En effet, il contient parfois un certain taux de gravillons, c'est le cas du béton de sable chargé. L'ajout de petite quantité de gravillons peut augmenter certaines caractéristiques à savoir la résistance, la maniabilité, le retrait et le fluage). Toutefois, le rapport Gravillons/Sable (G/S) doit rester inférieur à 0.7 (Figure 1-4) [3].

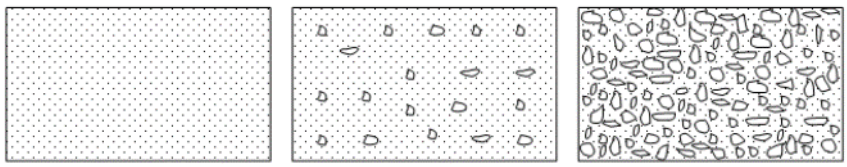


Figure 1-4 Schéma explicatif de l'apparence du BS pur, BS chargé et du béton traditionnel [3]

1.8.3. Simple mise en place

Par rapport au béton conventionnel, la granulométrie fine et la consistance plastique et très plastique du BS facilitent sa mise en place, en particulier dans les zones fortement renforcées. L'utilisation d'additifs dans le BS augmente la compacité de sa charpente granulaire et joue un rôle important dans son comportement rhéologique en lui donnant plus de fluidité. De plus, l'aspect de la finition et l'esthétique de l'ouvrage sont plus garantis après l'utilisation de BS.

1.8.4. Faible tendance à la ségrégation

Le BS contient beaucoup d'éléments fins et ne contient pas de gravier, il a donc une plus grande homogénéité, ce qui le rend plus performant que le béton conventionnel en termes de phénomènes de ségrégation. De Larrard [28] a constaté que des doses élevées de gravier ou de superplastifiants et des rapports eau-ciment élevés dans le béton augmentent le risque de ségrégation, alors que, d'autre part, une répartition uniforme de la structure granulaire minimise ce risque.

1.8.5. Légèreté et résistance

Le béton de sable, composé principalement de sable fin comme granulat, présente des caractéristiques spécifiques qui en font un matériau prometteur dans le domaine de la construction, notamment en termes de légèreté et de robustesse. Des études ont démontré que ce type de béton peut être significativement allégé tout en conservant des propriétés mécaniques satisfaisantes. Madani Bederina [29], a montré que l'incorporation de copeaux de bois dans le béton de sable permet de réduire sa densité, tout en améliorant ses propriétés thermiques. Les résultats de cette recherche révèlent que le béton conserve une résistance mécanique adaptée pour de nombreuses applications.

De même, Derabla et Benmalek [30] ont étudié l'utilisation du sable dunaire dans un béton formulé avec des sous-produits industriels. Les résultats obtenus ont mis en évidence une résistance à la compression comprise entre 15 et 20 MPa, rendant ce béton apte aux applications structurelles. Par ailleurs, cette recherche a également démontré une bonne adhérence du béton de sable aux armatures en acier, un atout important pour son utilisation dans des structures renforcées.

Moukete[31], a étudié le béton à base de sable de carrière combiné au sable alluvionnaire, une attention particulière a été portée à l'étude des propriétés de ce béton spécifique. Cette combinaison de sables permet d'optimiser les caractéristiques mécaniques et la durabilité du matériau, tout en réduisant sa densité globale. Le sable de carrière, grâce à sa granulométrie anguleuse, améliore l'interconnexion entre les particules dans la matrice du béton, tandis que le sable alluvionnaire, avec sa texture plus arrondie, favorise un meilleur compactage et une réduction de la porosité. Les résultats de cette recherche montrent que l'utilisation conjointe de ces deux types de sable permet de produire un béton plus léger que les bétons classiques, tout en maintenant une résistance à la compression et une durabilité satisfaisantes, adaptées aux applications structurelles et non structurelles. En outre, l'analyse microstructurale a révélé que la combinaison des deux sables favorise une bonne répartition des particules dans la matrice cimentaire, ce qui réduit les zones de faiblesse potentielles. Par conséquent, ce type de béton offre une alternative intéressante aux bétons traditionnels en alliant légèreté, robustesse et durabilité, tout en valorisant les ressources locales.

1.9. Formulation d'un béton de sable

La formulation des bétons traditionnels vise généralement l'obtention de certaines caractéristiques essentielles (ouvrabilité et résistance mécanique) par la combinaison de leurs composants (ciment, sable, gravillon et eau). Pour ce faire, il existe un large choix de méthodes de formulation pour cibler ces propriétés, en fixant, d'une manière générale, la taille des plus grands agrégats en fonction de considérations technologiques [24].

L'application des méthodes de formulation des bétons ordinaires entraîne habituellement de très forts dosages de ciment. Par conséquent, les pâtes de ces bétons contiennent en plus du ciment et de l'eau, des additions et des adjuvants pour minimiser le dosage du ciment afin de combler la porosité de la pâte afin d'obtenir l'ouvrabilité désirée [11].

Deux méthodes de formulation sont présentées : une première théorique, principalement basée sur la compacité du BS à partir de la relation de Caquot, et une seconde, qui est expérimentale, impliquant la réalisation de gâchées [3].

1.9.1. Approches théoriques

- **La compacité et les méthodes de formulations des bétons**

Caquot a pu établir une relation mathématique entre le volume de vides (v) d'un mélange granulaire et son expansion granulaire (d/D), sur la base de résultats expérimentaux.

$$V=V0\left(\frac{d}{D}\right)^{0.2} \quad (1)$$

Avec V0 : constante expérimentale variant entre 0.7 et 0.8.

- **Estimation du dosage en fines d'un béton de sable**

Il s'agit de déterminer la quantité de fines du béton de sable d'après la compacité de ses constituants, de manière à séparer les fines (<80µm) et le sable (80µm/D). (D représente le diamètre maximal du sable) . Ce dernier représente une porosité (Ps) suivant la relation de Caquot :

$$\mathrm{Ps} = 0.75\ (\frac{0.08}{\mathrm{D}})^{0.2}\ (\%\ \text{volumique}) \quad (2)$$

En appliquant diverses hypothèses de travail sur la définition de [fines], le volume des particules ne dépassant pas 80 μm, et en désignant par [v] le volume de vide associé à la pile de ces fines, Caquot a obtenu la conclusion suivante :

$$[\text{fines}] = [V] \qquad (3)$$

En combinant (2) et (3) on obtient le dosage volumique optimal :

$$[\text{fines}] = 0.38(\frac{0.08}{D})^{0.2}\ (\%\ \text{volumique}) \qquad (4)$$

Cette formule montre que la concentration en fines est principalement fonction de la limite supérieure de dimension du plus gros granulat. Il est clair que, lorsque le diamètre D est réduit, le dosage en fines augmente (Figure 1-5)[3].

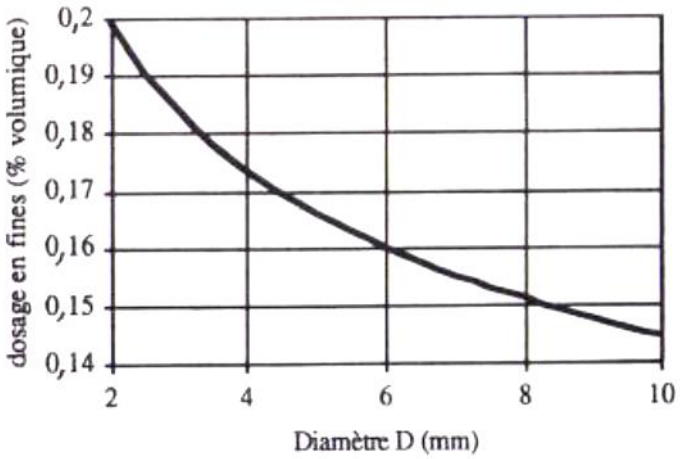


Figure 1-5 Influence du diamètre D du sable sur le dosage en fines [3]

- **Porosité et dosage en eau d'un béton de sable**

Pour optimiser le squelette particulaire d'un béton contenant des fines, il est nécessaire de maintenir un certain niveau de porosité. L'obtention d'une compacité maximale et d'une porosité minimale n'est possible que dans des conditions de mise en œuvre spécifiques. En effet, la consistance du béton doit se situer à un certain niveau. Si l'on suppose que les vides intergranulaires sont composés de deux volumes, à savoir un volume d'eau (e) et un volume de vides piégés (v), la porosité minimale théorique du béton peut être déterminée à l'aide d'une formule issue des travaux de recherche sur la compacité de Caquot[3].

$$(e+v)Min = 0.8(\frac{d}{D})^{0.2} \quad (5)$$

Avec d/D : l'étendue granulaire y compris les fines.

La détermination de la porosité minimale nécessite l'utilisation du paramètre d, qui représente le seuil inférieur de l'étendu granulaire (Figure 1-6) [3]. Cependant, l'estimation précise de cette valeur peut être difficile en raison de l'apparition potentielle d'effets de floculation dans l'eau à l'échelle microscopique des particules fines. Par conséquent, dans les cas où un mélange est complètement défloculé, d peut être défini comme la moyenne harmonique de la taille de grain du plus petit constituant. Une fois cette valeur connue, la surface spécifique peut être calculée en conséquence.

f (finesse Blaine par exemple en cm^2/g) de ce constituant et sa densité ρ (exprimée en g/cm3), le diamètre moyen des grains. L'assimilation dans une sphère est donnée par la formule suivante:

$$d = \frac{60}{f.\rho} \quad \text{en mm} \quad (6)$$

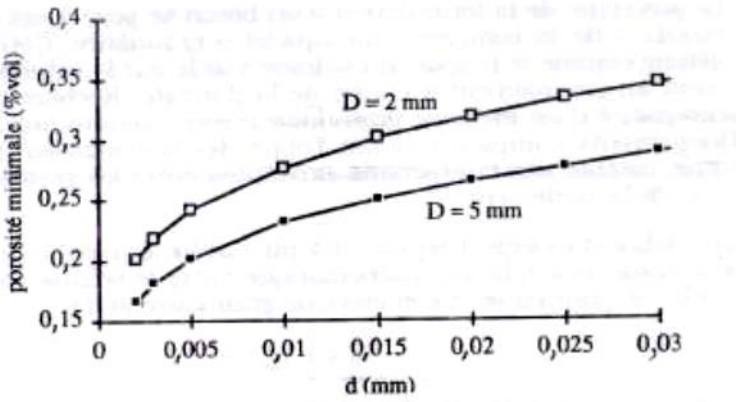


Figure 1-6 Influence de la dimension d sur la porosité minimale du béton pour deux tailles D de sable [3]

Afin de déterminer la quantité appropriée d'eau nécessaire, il est essentiel d'évaluer la quantité d'air piégé présente. En ce qui concerne les bétons de sable, la quantité d'air emprisonné est

légèrement supérieure à celle des bétons ordinaires. Pour estimer cette quantité, la formule suivante peut être utilisée, ce qui donne des teneurs en air allant d'environ 3 % à 5 %.

$$[\text{Vides}] = k[\text{eau}]\ (\text{L/m3}) \qquad (7)$$

Avec k : une constante prise entre 0,1 et 0,25.

La maniabilité du béton est considérablement affectée par la quantité d'eau utilisée pendant le processus de formulation. Ceci, bien sûr, est également influencé par la présence ou l'absence d'adjuvants rhéologiques. En respectant les directives de formulation susmentionnées, qui privilégient l'obtention d'une densité maximale, il est essentiel que les bétons de sable possèdent une maniabilité optimale. Plus précisément, l'ouvrabilité doit être comprise entre 7 et 10 secondes selon le compteur d'ouvrabilité du mortier LCL [3].

- **Estimation du dosage en sable**

Pour estimer le dosage en sable, il suffit de compléter au mètre cube la somme des dosages des constituants fines, eau et vides [3]

$$[Sable] = 1000 - [fines] - [eau] - [vides]\ (\text{L/m}^3) \qquad (8)$$

1.9.2. Méthode expérimentale de formulation

- **Détermination d'une formule de base sans fines d'addition**

L'objectif de cette étape initiale est de combiner le ciment, l'eau, le sable et l'adjuvant afin d'atteindre une plage d'ouvrabilité souhaitée de 7 à 10 secondes à l'aide du mesureur d'ouvrabilité LCL.

- **Choix du dosage du ciment**

En règle générale, les normes dictent la quantité minimale de ciment requise en fonction des spécifications décrites. On choisit donc de travailler avec un dosage en ciment fixé qui ne variera pas tout au long de l'étude, on le note C (Kg/m3).

- **Fixation du dosage en eau**

Le volume en eau (e) est souvent choisi selon l'expérience (généralement 220 l d'eau pour 350 kg de ciment, 250 l pour 400 kg de ciment) et il sera ajusté, si nécessaire en fonction de la maniabilité désirée.

- **Estimation du dosage de sable**

Dans cette formule, il faut introduire un fluidifiant réducteur d'eau, au dosage préconisé par le fabricant (N% du poids des éléments inférieurs à 80 μm en extrait sec), qui permettra de défloculer les fines. D'autre part, un béton contient toujours un volume d'air, Vair, la teneur en air des bétons de sable est toujours supérieure à celle des bétons ordinaires et se situe entre 5 et 7 % de volume du béton

$$vc + ve + Vadj + vair + vsable = 1000 \text{ (litres)} \quad (9)$$

- **Estimation du dosage en fines d'addition**

L'objectif principal de la méthode expérimentale est de développer des bétons de sable, sans intention d'expliquer ou de formaliser les phénomènes sous-jacents impliqués dans la préparation du béton. Bien qu'il existe d'autres méthodes disponibles, elles peuvent différer selon les approches théoriques et les pratiques de travail, mais l'objectif ultime reste constant : créer le béton le plus dense possible tout en répondant aux autres critères requis tels que la pompabilité, la capacité de moulage et de projection. Le ciment est souvent utilisé pour mieux remplir les obligations contractuelles ou les spécifications, qui stipulent généralement une quantité minimale. Cette méthode est une adaptation de la méthode Baron-Lesage, connue pour son caractère itératif et la génération de déchets légers. Les principales caractéristiques du mélange sont sa maniabilité et sa densité apparente, toutes deux mesurées à l'aide d'un mortier LCL.

Cette méthode a été utilisée pour créer diverses formulations de béton de sable, telles que le béton de pieux, le béton routier et le béton projeté. Les résultats ont été très satisfaisants [3]

1.10. Résumé des différentes étapes de la formulation [3]

- Détermination d'une formule de base sans fines d'addition :
- Choix de la teneur en ciment.
- Fixation d'une teneur en eau.
- Détermination de la quantité de sable.
- Ajustement de la maniabilité et du rendement.
- Détermination du dosage en fine d'addition.
- Adaptation de la maniabilité à la mise en œuvre.
- Contrôle de la résistance.

1.11. Caractéristiques du béton de sable de dunes à l'état frais

1.11.1. Maniabilité

La maniabilité du béton, en général, est principalement déterminée par la teneur en eau. Plus précisément, lorsqu'il s'agit de béton de sable de dune, la présence d'eau joue un rôle crucial dans l'obtention d'une maniabilité optimale. Cela est dû aux caractéristiques uniques des grains de sable, qui possèdent une surface spécifique nettement plus grande. En conséquence, une plus grande quantité d'eau est nécessaire par rapport au béton ordinaire. Le rapport eau-ciment (E/C) pour le béton de sable des dunes se situe généralement entre 0,6 et 0,7, ce qui est supérieur à celui du béton ordinaire. Cependant, lorsque l'on considère le rapport eau/(ciment+filler) (W/(C+F)), on constate qu'il est similaire à celui du béton ordinaire [3].

1.11.2. Effet des fillers

Sur la base de la littérature disponible, Bederina [32] et Guoxue et al[33] ont documenté que la maniabilité du matériau s'améliore à mesure que la quantité de fines (ciment ou filler) augmente. De plus, il a été observé que l'utilisation de fines particules sphériques contribue à l'amélioration de la maniabilité(Figure 1-7) [3]. A l'inverse, Chaouch [34] a découvert que la maniabilité diminue initialement pour les sables dunaires, mais après avoir atteint un certain point optimal, elle recommence à s'améliorer .

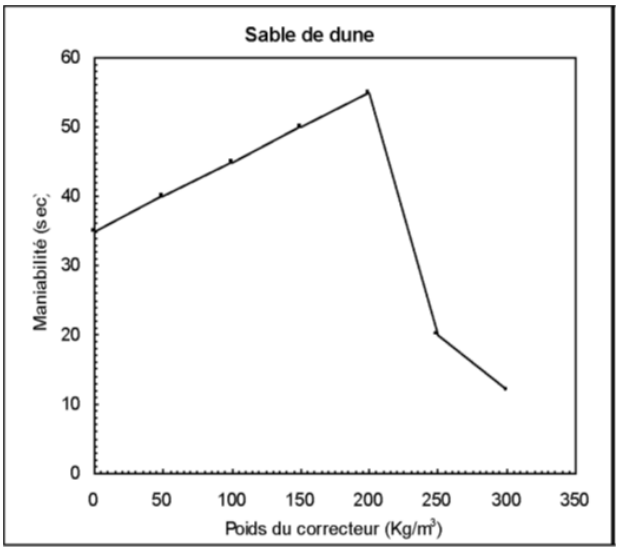


Figure 1-7 Effet des ajouts sur la maniabilité du béton de sable [3]

1.11.3. Effet de la granulométrie du sable

Sur la base du diagramme fourni par Chanvillard et al [24], il apparaît que l'ouvrabilité du matériau augmente à mesure que le module de finesse augmente. Cette corrélation a également été étayée par les conclusions de Bederina [32]. Ainsi, on peut conclure que l'ouvrabilité du béton s'améliore à mesure que le diamètre maximal des grains augmente. Par conséquent, le béton de sable alluvial présente une maniabilité supérieure par rapport au béton de sable de dune, illustrant l'impact du diamètre maximal des grains sur la maniabilité (Figure 1-8)[3].

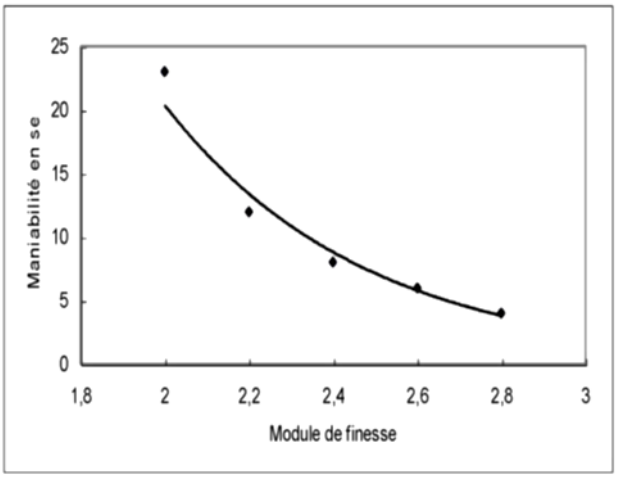


Figure 1-8 Effet de la granulométrie du sable [3]

1.11.4. Effet du rapport E/C

La maniabilité du béton fait avec du sable dépend du rapport (E/C+F). En général, l'augmentation de ce rapport améliore considérablement l'ouvrabilité du béton[35] (Figure 1-9) [3].

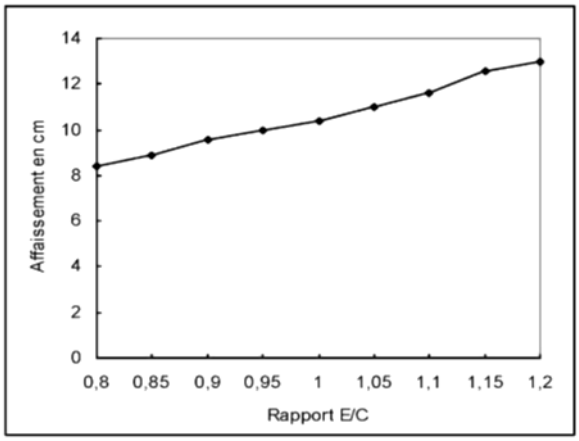


Figure 1-9 Effet du rapport E/C sur la maniabilité [3]

1.11.5. Compacité

Le niveau de compacité d'un mélange granulaire est directement influencé par la taille de ses plus gros grains. Lorsque le diamètre du plus gros grain diminue, la porosité du mélange augmente. Dans le cas du béton de sable de dune, les granulats utilisés ont un diamètre qui ne dépasse pas 1 mm Pour compenser la porosité résultante, des fines sont ajoutées pour combler les espaces entre les grains. En conséquence, le béton de sable est systématiquement moins compact que le béton ordinaire [53].

1.11.6. Effet de la granulométrie du sable sur la compacité

La perméabilité du béton de sable est influencée à la fois par la taille des grains et le type de sable utilisé. Lors de l'utilisation de sable de dune, une proportion plus élevée de particules fines (d'une taille maximale inférieure à 1 mm) est nécessaire par rapport au sable alluvial (d'une taille maximale d'environ 5 mm). En général, plus il y a de fines présentes, plus la porosité du béton de sable obtenu est élevée[3].

1.11.7. Effet des ajouts de fines

Chauvin et Grimaldi [20] indiquent que la fonction première des fines est d'augmenter la densité du béton de sable des dunes en remplissant ses espaces vides. Selon Bederina et al [54], plus le dosage des fines augmente, plus la compacité s'améliore. Ils ont également observé qu'après avoir atteint un dosage optimal, la compacité commence à décliner. De plus, la finesse des charges influence la compacité, une finesse plus élevée nécessitant un dosage plus important de charges pour une compacité optimale dans le béton[3].

1.12. Caractéristiques du béton de sable de dunes à l'état durci

1.12.1. Effet des fillers

La durabilité globale du béton de sable est affectée par la présence de fines, y compris leurs proportions, leur finesse et leur composition[3]. Des études antérieures de Chaouch[34] et al et Sablocrete [3]ont montré que la quantité et la finesse des fines influencent la compacité du béton, qui à son tour affecte sa résistance à la compression. Ce constat a également été étayé par des recherches menées par Bederina et al [36] ainsi que Guoxue et al[33]. Par ailleurs, la nature des fines a été testée et comparée, révélant que les calcaires fins présentent la plus forte réactivité avec le ciment et offrent la plus forte résistance [37, 38] (Figure 1-10)[3].

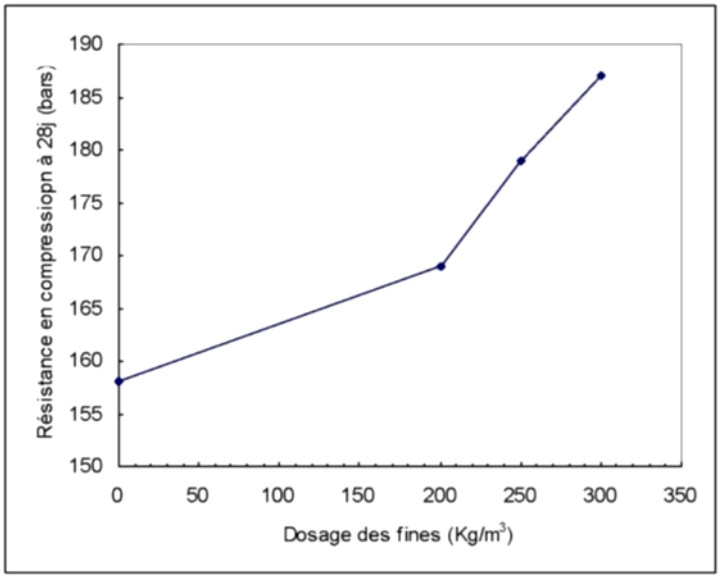


Figure 1-10 Effet du dosage en fines sur la résistance en compression du béton de sable de dunes [3]

1.12.2. Effet de la granulométrie du sable sur le comportement mécanique

Dans le cas où le rapport eau/ciment (E/C) est maintenu constant, la relation entre la résistance et la granulométrie (Dmax) dans le béton n'est pas simple. Contrairement à l'ouvrabilité, où la résistance mécanique s'améliore à mesure que Dmax augmente, la littérature indique que la résistance diminue à mesure que Dmax diminue, tandis que l'ouvrabilité reste constante avec des rapports E/C variables. Cela peut être attribué au fait qu'une partie importante de la résistance du béton provient de ses granulats, qui proviennent généralement de roches naturelles et possèdent une résistance mécanique élevée. De plus, la demande en eau est réduite lorsque des granulats grossiers sont utilisés. Il est à noter qu'à niveau d'ouvrabilité égal, la résistance du béton réalisé avec du sable de dunes est nettement inférieure à celle réalisée avec du sable alluvionnaire [39] (Figure 1-11)[3].

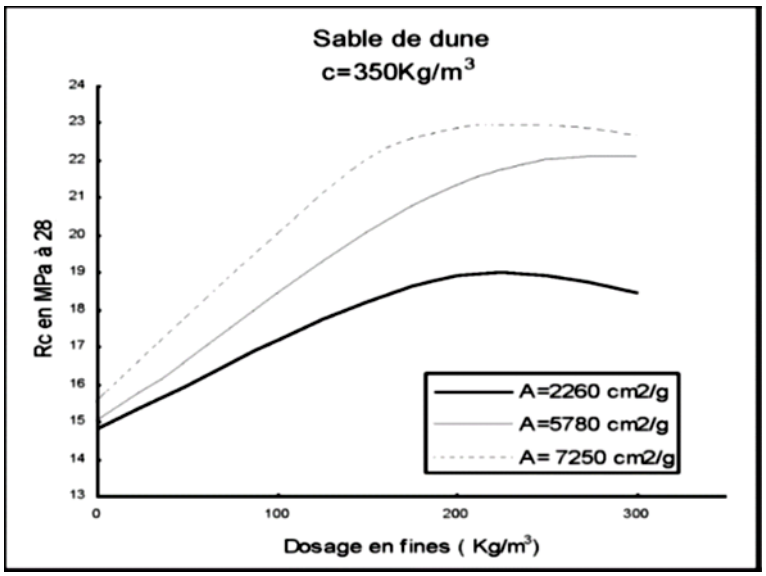


Figure 1-11 Effet des fines sur la résistance à la compression du béton de sable [3]

1.13. Conclusion

Ce chapitre bibliographique a fourni une analyse approfondie des bétons de sable, mettant en lumière leur importance et leurs caractéristiques distinctives dans le domaine de la construction. En revisitant l'historique et en définissant clairement ce matériau, nous avons pu distinguer le béton de sable des bétons traditionnels et des mortiers, en soulignant ses applications variées telles que la projection, les fondations profondes, la préfabrication, et la construction routière.

Nous avons également détaillé la composition spécifique du béton de sable, notamment le rôle des différents constituants tels que les sables, les ciments, les fillers, les adjuvants, et l'eau. Les avantages du béton de sable, comme sa simplicité de mise en place et ses particularités telles que la quantité de pâte et de gros granulats, ont été examinés, soulignant son efficacité et sa praticité.

La section sur la formulation du béton de sable a présenté des approches théoriques et expérimentales, mettant en évidence les méthodes de calcul pour la compacité, le dosage en fines, et la porosité. Nous avons aussi exploré les caractéristiques du béton de sable de dunes à l'état frais et durci, en insistant sur les propriétés mécaniques, l'effet des fillers, et l'importance de la granulométrie du sable.

En conclusion, le béton de sable se révèle être un matériau polyvalent et performant, adapté à diverses applications dans le secteur de la construction telles les panneaux 3D en béton de sable pour la construction de structures légères et isolantes, les applications de pavage afin de créer des chaussées durables ou encore pour la réalisation de dalles armées, de poteaux et de murs, offrant une alternative économique et écologique dans la construction de bâtiments. Sa formulation précise et ses caractéristiques spécifiques en font un choix avantageux pour des projets nécessitant à la fois durabilité et légèreté. Ce chapitre bibliographique constitue ainsi une base solide pour une compréhension approfondie et une utilisation optimale du béton de sable dans des contextes variés.

2. CHAPITRE 2 : BETONS LEGERS

2.1. Introduction

Le béton léger est un matériau de construction essentiel dans l'industrie du bâtiment. Particulièrement prisé pour ses propriétés isolantes et sa faible densité, offrant des avantages significatifs en termes de réduction de poids des structures et d'amélioration des performances énergétiques. Son utilisation est cruciale dans la réduction de la consommation énergétique, notamment en Algérie, où l'efficacité énergétique des bâtiments est un enjeu majeur.

Ce chapitre est structuré en deux parties distinctes. La première partie fournit une vue d'ensemble des bétons légers, en explorant leurs définitions, leurs caractéristiques principales, et leurs avantages généraux par rapport aux bétons traditionnels. La seconde partie se concentre spécifiquement sur deux types de bétons légers d'intérêt : les bétons de bois et les bétons de polystyrène. Ces deux variantes, qui intègrent respectivement des copeaux de bois et des billes de polystyrène expansé, représentent des solutions innovantes pour la construction durable, avec des propriétés spécifiques qui répondent aux exigences modernes en matière de performance thermique et environnementale.

2.2. Situation énergétique

À l'échelle mondiale, la croissance démographique, l'élévation du niveau de vie et des déplacements accrus, ainsi que les dynamiques de la mondialisation, contribuent à une consommation effrénée d'énergie. Le charbon, le gaz naturel et surtout le pétrole, principales sources d'énergie fossile, répondent à environ 80% des besoins mondiaux. L'économie mondiale repose sur une croissance alimentée par ces énergies, en particulier les énergies fossiles. Selon l'Agence Internationale de l'Énergie, la demande énergétique mondiale devrait connaître une augmentation significative, estimée à 40% entre 2009 et 2035[40].

2.3. La consommation de l'énergie en Algérie

En 2021, la consommation finale dans divers secteurs a affiché des tendances distinctes : une augmentation de 6,2% dans le secteur des "Ménages et autres", atteignant 23,4 millions de Tep, portée par la croissance des sous-secteur résidentiel (4,4%) et tertiaire (12,3%); une reprise de 7,6% dans le secteur des transports, passant 13,5 M Tep en 2020 à 14,5 millions de Tep,

principalement due à l'augmentation de la demande en carburants terrestres et aériens (gasoil 5,1%, GPL/C 35,8%, essences 1,8%, jet 15,1%), en lien avec le redémarrage du transport routier et la réouverture progressive de l'espace aérien; et finalement, une hausse significative de 12% dans le secteur des "Industries et BTP", atteignant 12,2 millions de Tep en 2021, en raison de la reprise de l'activité économique, notamment dans les sous-secteurs ISMME, industries agroalimentaires, chimie et matériaux de construction [41].

Le Tableau 2-1[41] , résume Le détail de la consommation finale d'énergie par secteur d'activité

Tableau 2-1 Consommation finale d'énergie par Secteur d'activité [41]

Unité : K Tep	**2022**	**2023**	**Évolution Quantité**	**Évolution (%)**
Industrie et BTP, dont :	**12 596**	**13 394**	**799**	**6,3**
Matériaux de construction	5 113	5 458	345	6,8
ISMME	2 842	3 067	224	7,9
BTP	3 284	2 674	-610	-1,7
Industries Manufacturières, dont :	1 357	1 460	103	7,6
Industries Agroalimentaires	1 213	1 343	130	10,7
Chimie	709	729	21	2,9
Autres industries	1 955	2 071	116	5,9
Transport, dont :	**15 297**	**16 083**	**787**	**5,1**
Routier	14 313	15 028	714	5
Aérien	262	527	265	101,4
Ménages et autres, dont :	**25 214**	**24 726**	**-488**	**-1,9**
Résidentiel	18 168	17 618	-551	-2,9
Agriculture	799	787	-12	-1,5
Tertiaires et autres	**5 195**	**5 271**	**76**	**1,5**
TOTAL	**53 106**	**54 204**	**1 098**	**2,1**

D'après le tableau 2-1*[41]*, il est notable que la consommation finale d'énergie demeure largement influencée par le secteur des « Ménages et autres », représentant une part prédominante de 47%. Le secteur du « transport » suit de près avec 29%, tandis que le secteur de « l'industrie et de la construction » représente une part significative de 24%. Ceci est illustré dans le graphe ci-après (Figure 2-1) [41].

En conclusion, on remarque une hausse (6,3%) de la consommation du secteur « Industries et BTP» à 13,4 M Tep en 2023. C'est le résultat de la reprise de l'activité économique, portée

notamment par les sous-secteurs ISMME et matériaux de construction en rapport avec la reprise de l'activité économique, tirée notamment par les sous-secteurs ISMME, industries Agroalimentaires, Chimie et matériaux de construction.

Il est indéniable que le secteur du bâtiment demeure énergivore. La nécessité de réduire cette dépense énergétique est pressante, surtout lorsque près de 80% de cette dépense est attribuée au chauffage et/ou à la climatisation, souvent dans des habitations non isolées thermiquement. Pour répondre à ce défi, il est crucial d'adopter une approche nouvelle et objective en faveur de l'isolation thermique des habitations. Des mesures d'efficacité énergétique adaptées doivent être mises en œuvre, tout en préservant le confort des occupants. Sur le plan technique, l'accent est mis sur les solutions et les produits technologiques visant à réduire à la fois la consommation d'énergie et les pertes énergétiques dans les bâtiments. En somme, une action concertée et déterminée est nécessaire pour protéger l'environnement tout en assurant un cadre de vie confortable et durable [42].

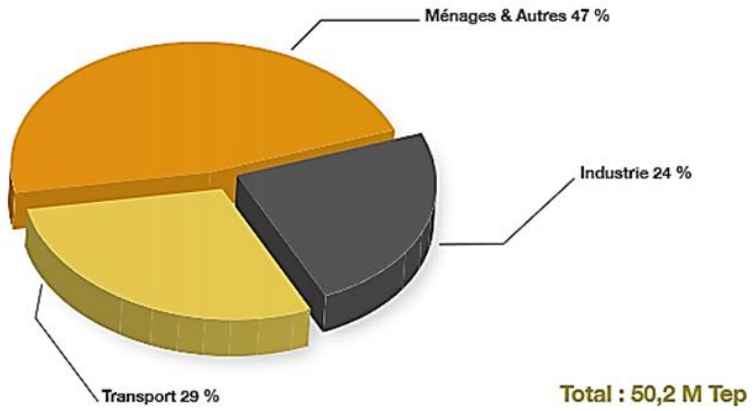


Figure 2-1 structure de la consommation finale d'énergie par secteur d'activité [42]

2.4. Isolation thermique dans le bâtiment

La majorité des immeubles résidentiels comporte une isolation thermique verticale par L'intérieur (ITI). Le mode constructif le plus répandu est basé sur la réalisation d'une enveloppe de bâtiment en béton banché, sur laquelle viennent s'appuyer les planchers. Cette méthode, par ailleurs compétitive et performante pour l'inertie, génère des ponts thermiques importants au point de raccordement entre le voile de façade et la dalle, sources d'environ 15% à 30% des déperditions énergétiques totales de la construction [43] (Figure 2-2)[44].

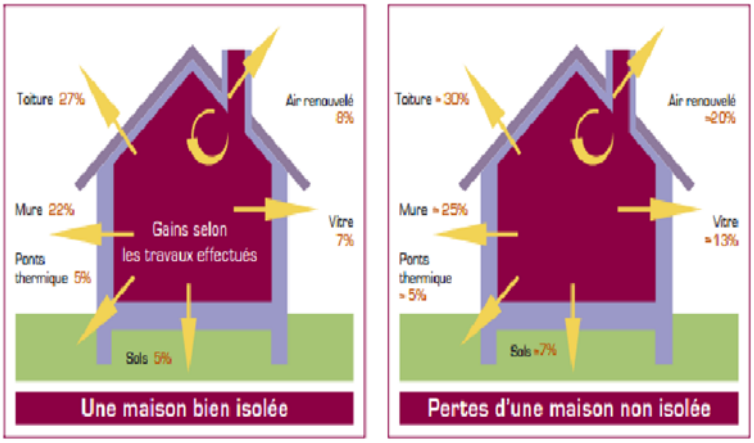


Figure 2-2 Comparaison entre une construction bien isolée et non isolée [44]

Deux approches sont suggérées pour résoudre les problèmes de déperdition d'énergie dans la construction. Tout d'abord, l'utilisation de rupteurs thermiques au niveau de la liaison entre le voile de façade et la dalle est recommandée. Ces rupteurs remplacent la jonction traditionnelle par des éléments composés de matériaux isolants. Selon BURCKEL, Thierry et al. le volume économisé permet d'augmenter l'isolant et de les pertes thermiques linéiques de plus de 70 % [43].(Figure 2-3)[43, 44].

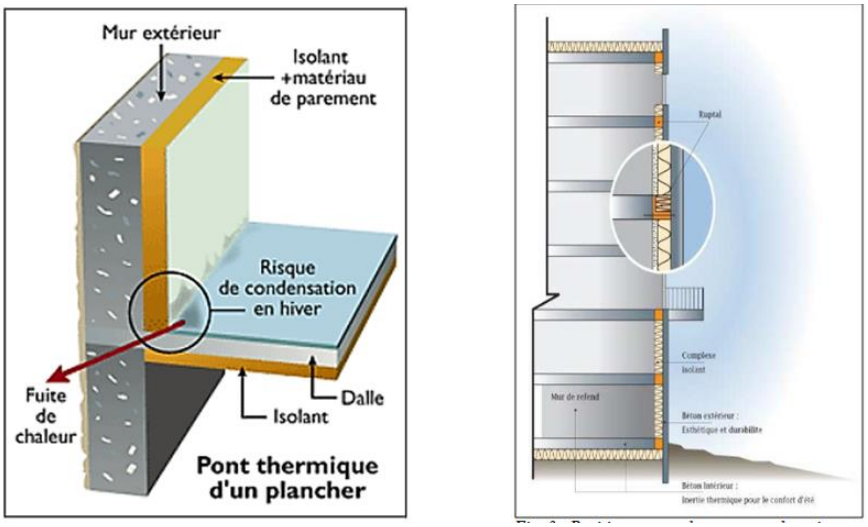


Figure 2-3 Positionnement des rupteurs thermiques continus dans un bâtiment isolé par l'intérieur [43]et Illustration d'un pont thermique[44]

Une autre solution technique consiste en l'isolation répartie, qui traite à la fois les déperditions au niveau des murs et des ponts thermiques. L'isolation répartie repose sur le principe de conserver le bénéfice des systèmes de chauffage aussi longtemps que possible grâce à l'inertie thermique de l'air. Elle implique principalement l'utilisation de maçonnerie en béton cellulaire ou en brique isolante de terre cuite dotée d'un réseau d'alvéoles. Ces matériaux isolants tirent leur efficacité de la présence significative d'air. Ils remplissent à la fois une fonction structurelle et une fonction isolante, permettant ainsi la construction de murs extérieurs à "isolation répartie". Les pertes d'énergie au niveau des ponts thermiques demeurent faibles grâce aux capacités isolantes du mur. L'intérêt de l'isolation répartie réside dans la conception d'éléments structuraux des bâtiments au niveau des murs ainsi qu'au niveau des planchers. Cela nécessite l'utilisation de matériaux présentant à la fois de bonnes performances mécaniques et des propriétés d'isolation thermique améliorées [42].

2.5. Généralités sur les bétons légers

Les bétons légers (LWC) peuvent être composés d'une large gamme d'agrégats légers à usage spécial (inclusions) qui ont une densité inférieure à celle du sable et du gravier normaux, utilisés dans le béton normal [45, 46]. Il s'agit notamment de granulats extrêmement légers tels que les vides d'air (c'est-à-dire le béton cellulaire), les particules de polystyrène expansé (c'est-à-dire le béton EPS), ainsi que des granulats relativement lourds comme les argiles expansées ou les schistes (Figure 2-4)[47].

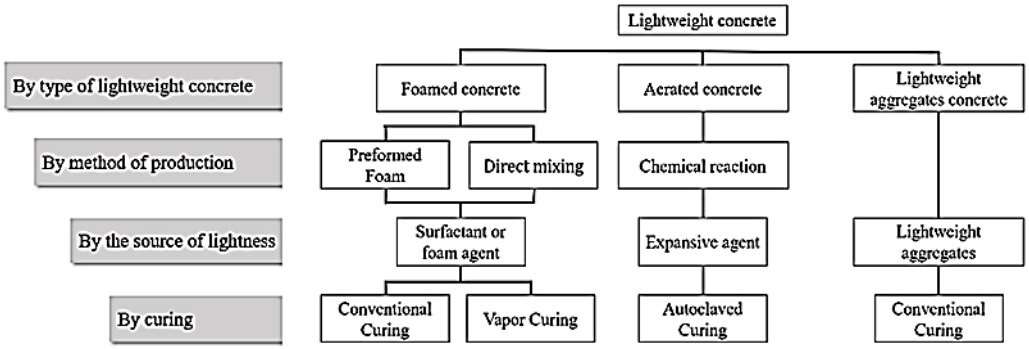


Figure 2-4 Organigramme des différents types de bétons légers[47]

En raison de l'utilisation d'inclusions légères, il est évident que la densité du LWC est réduite par rapport au béton normal et que le LWC peut être classé selon le type d'inclusions légères. La Figure 2-5 montre la variété de LWC utilisés dans les constructions préfabriquées avec des densités allant de 300 kg/m3 à 2 000 kg/m3 [48].

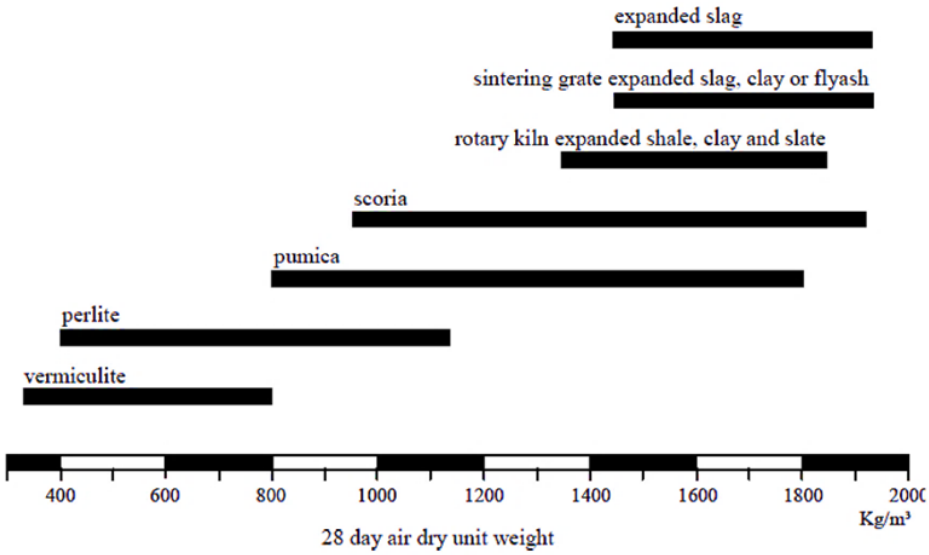


Figure 2-5 Types de bétons légers utilisés dans l'industrie de la construction (reproduit d'après Zareef) [48]

2.6. Historique des bétons légers

Le béton léger n'est pas une réalisation moderne de la technologie du béton. Ils sont connus depuis l'Antiquité et constituent pour l'essentiel les précurseurs du béton d'aujourd'hui. Les premiers bâtiments en béton léger d'Europe ont été construits il y a plus de deux mille ans, au début de l'Empire romain.

Le Panthéon de Rome, en Italie, a été construit en 1977 après JC. 128 après JC, peut être considéré comme l'un des exemples les plus célèbres.

Pendant des siècles, les ingénieurs ont été étonnés par l'utilisation systématique de divers agrégats naturels légers dans l'opus caementitium (béton romain), comme en témoignent leur démonstration impressionnante et leur admiration dans diverses disciplines [49].

L'utilisation du béton léger s'est heurtée à des restrictions suite au déclin de l'Empire romain, principalement en raison de la rareté et de l'incohérence des agrégats volcaniques naturels. Cependant, une étape importante dans la technologie des matériaux s'est produite au cours des 19eme et 20eme siècles avec l'avènement et la fabrication de granulats légers produits industriellement [50, 51].

2.7. Définition du béton léger

Le béton léger (LC) est une matrice minérale, ou granulat léger, contenant de l'air ou des bulles d'air. D'une manière générale, le LC est conçu pour avoir une densité inférieure, allant de 400 à 1 850 kg/m3, par rapport au béton normal, qui a une densité de 2 000 à 2 600 kg/m3, et au béton lourd, qui a une densité supérieure à 2 600 kg/m3. De plus, LC présente d'autres avantages. Il peut présenter une résistance mécanique acceptable selon sa densité, réduit les coûts de construction, offre une structure légère et respectueuse de l'environnement et améliore la résistance au feu et l'isolation phonique.

2.8. Domaines d'utilisation

Au cours des dernières décennies, Le béton léger (LWC), en particulier, est devenu un matériau important et polyvalent qui a été considérablement amélioré grâce aux efforts scientifiques. Le LWC est considéré comme l'un des matériaux prometteurs dans la construction moderne en raison des énormes avantages qui peuvent être obtenus tant sur le plan structurel qu'écologique [52].

2.8.1. Structurellement

En termes de structure, cela présente de nombreuses utilisations pratiques, notamment dans les constructions lourdes où le poids total est déterminé par le poids propre et où l'on constate une réduction notable de ce poids propre.

La réduction de poids est particulièrement importante pour les qui subissent souvent des charges plus élevées que prévu. Par exemple, Lors de la surélévation d'un bâtiment, l'ajout de nouveaux étages entraîne une augmentation des charges portées par la structure existante. Dans ce contexte, l'utilisation de bétons légers permet de réduire l'impact de cette surcharge, en allégeant la structure tout en garantissant sa résistance, ce qui permet de maintenir la sécurité du bâtiment malgré l'ajout de nouveaux étages.

LWC s'est avéré très avantageux dans les bâtiments à plusieurs étages en raison de sa capacité à offrir flexibilité et économies de coûts. Il améliore également la réponse structurelle à l'activité sismique, permet des portées plus longues, améliore la résistance au feu et réduit le besoin de matériaux de renforcement et de fondation [53, 54]. De plus, l'utilisation d'éléments préfabriqués en LWC permet de minimiser les frais de transport et de placement [55]. Lorsqu'il s'agit de ponts, LWC peut jouer un rôle déterminant en permettant plus de voies et des portées plus longues.

Dans les ponts de type cantilever, le LWC peut être utilisé d'un côté de la pile et le béton ordinaire, de l'autre pour fournir l'équilibre du poids tout en s'adaptant à une portée plus longue du côté LWC [56].

2.8.2. Ecologiquement

D'un point de vue écologique, il est évident que le LWC possède une conductivité thermique nettement inférieure à celle du NWC, ce qui en fait un matériau isolant efficace qui peut contribuer de manière significative aux économies d'énergie.

En d'autres termes, l'utilisation de LWC possédant des caractéristiques thermiques régulées permet de conserver l'énergie généralement dépensée pour la climatisation dans les pays froids et chauds [57, 58]. La question de la pénurie d'énergie s'est récemment aggravée à un rythme inquiétant, faisant de l'énergie une question d'importance mondiale. Un autre avantage de LWC est sa capacité à incorporer de nombreux sous-produits industriels et agricoles dans sa production, offrant ainsi une solution rentable et respectueuse de l'environnement.

2.9. Granulats légers

Les granulats légers (LWA) sont définis dans des normes internationales telles que NF EN13055 [59], ASTM C330M [60], ASTM C331M [61] et ASTM C332 [62]. Les normes ASTM font la différence entre le LWA pour le béton léger structurel [60], le LWA pour l'application dans le béton léger de maçonnerie [61] et le LWA pour le béton isolant [62]. La norme européenne EN 13055 s'applique, entre autres, l'utilisation de LWA pour tout type de béton léger. Les normes mentionnées ne concernent toutefois que les LWA d'origine minérale. La norme EN 13055 énumère les LWA non pas par leur nom commun, mais définit leurs sources.

Les LWA peuvent être d'origine naturelle, fabriqués à partir de matériaux naturels, fabriqués à partir de sous-produits de processus industriels ou à partir de matériaux recyclés, ou de sous-produits de processus industriels [59].

Les normes ASTM contiennent une liste explicite d'agrégats légers : "Deux types généraux de granulats légers sont couverts par cette spécification : les granulats préparés par expansion, granulation ou frittage de produits tels que le laitier de haut fourneau, l'argile, la diatomite, les

cendres volantes, le schiste ou l'ardoise ; et les granulats préparés par traitement de matériaux naturels, tels que la pierre ponce, la scorie ou le tuf" [60]. En outre, les "agrégats légers constitués de produits finaux de la combustion du charbon ou du coke" sont énumérés dans la norme ASTM C331M [60]. La littérature, par exemple [63-65], fournit des détails sur les différents types de LWA, leurs propriétés et les processus de production typiques.

Outre leur origine, la définition des propriétés des agrégats, principalement la densité, est importante pour distinguer les agrégats de poids normal des agrégats légers. Les normes ASTM C330M [60] et ASTM C331M [61] fixent des limites supérieures pour la densité apparente en vrac : 1120 kg/m3 pour les LWA fins, 880 kg/m3 pour les LWA grossiers et 1040 kg/m3 pour la combinaison de LWA fins et grossiers. De plus, il devrait être possible de produire un béton structurel léger avec des LWA conformes à la norme ASTM C330M[60], comme indiqué dans le Tableau 2-2[61], où la résistance à la compression est déterminée sur des éprouvettes cylindriques [7].

Tableau 2-2 Les exigences en matière de résistance à la compression et de résistance à la traction par fendage pour les (LWA) [62]

Densité d'équilibre calculée max, kg/m	Résistance à la traction par fendage moyenne à 28 jours, min, MPa	Résistance à la compression moyenne à 28 jours, min, MPa
Tous les granulats légers		
1760 1680 1600	2.2 2.1 2.0	28 21 17
Combinaison de granulats à poids normal et de granulats légers		
1840 1760 1680	2.3 3.1 2.1	28 21 17

2.10. Définition et classification des bétons légers

Les bétons légers sont connus comme étant des bétons de faible densité, cette caractéristique peut être obtenue par plusieurs méthodes :

- Soit par substitution des gravillons traditionnels par des granulats allégés
- Soit par incorporation de bulles d’air [66]

Or, les trois emplacements possibles pour incorporer de l’air dans le béton sont :

- Dans la matrice (béton poreux), des bulles d'air sont générées lors du malaxage réaction chimique ou action physique.

- Entre les gros granulats (béton caverneux ou béton sans fines, c'est à dire sans sable),
- -Dans les granulats (béton de granulats légers).

Bien entendu, des combinaisons sont possibles, comme par exemple le béton caverneux léger utilisant des granulats légers. Ces trois types de béton léger sont illustré par la Figure2-6 [19]

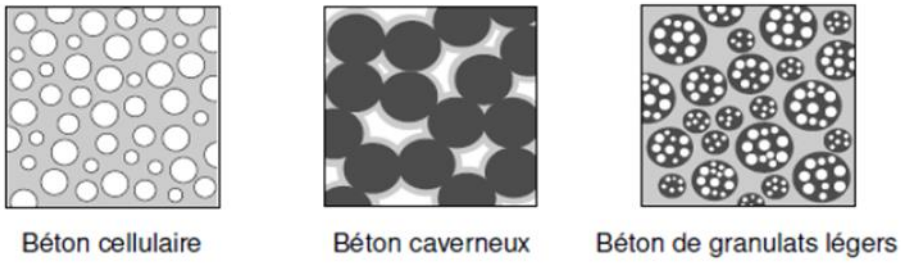


Figure 2-6 Représentation schématique des différents types de béton léger [20]

En Europe, le béton léger (LC) est considéré comme un matériau selon la norme EN 206 [67] et son application est réglementée par la norme EN 1992 [68]. Le niveau de résistance le plus bas est LC8/9, qui correspond à une résistance cylindrique caractéristique de 8 MPa et une résistance cubique caractéristique de 9 MPa [67]. Les normes de conception [68] exigent un niveau de résistance minimum de LC12/13 [67]. En raison du manque d'expérience pratique, une autorisation technique est requise pour les classes de résistance LC70/77 et LC80/88. La densité sèche de LC est de $800 \geq \rho d \leq 2000 kg/m3$. La plage de densité est divisée en classes de densité avec une plage de 200 kg/m3. Ainsi, il n'est pas possible de combiner librement les classes de résistance et de densité [67].

Cependant, la Figure 2-7[69] montre qu'un niveau de résistance LC spécifique nécessite qu'un niveau de densité (D) spécifique soit correctement défini. Comparé à d'autres types de béton léger, le LC possède une matrice cimentaire dense dont la surface est difficile à distinguer du béton de poids normal (NC). Or, les granulats légers ne sont visibles que sur les surfaces endommagées ou coupées.

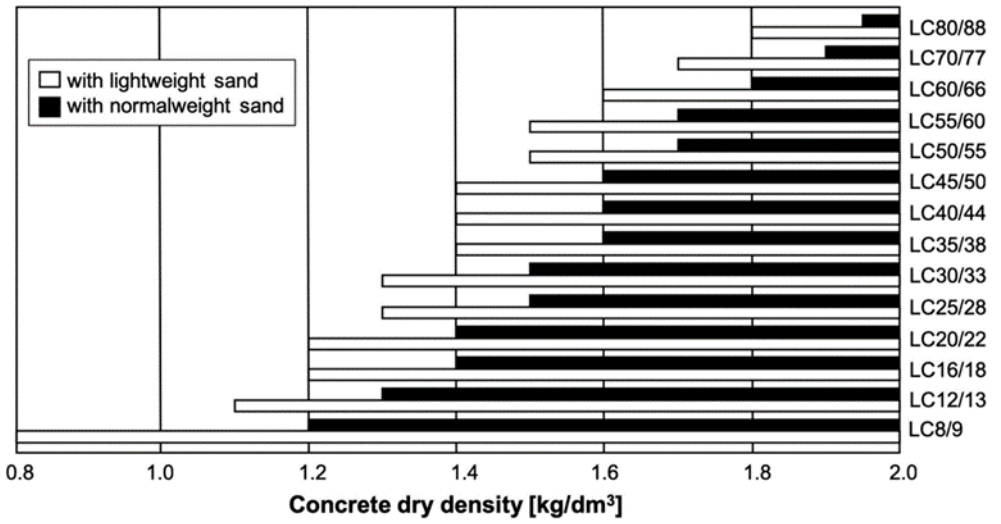


Figure 2-7 Corrélation entre les classes de résistance et la densité sèche nécessaire pour le béton léger [69]

2.11. Evolution et Classification du Béton Léger : LWC à SLWC, ILC, ULWC et Warm béton

Dans de nombreux codes de conception internationaux, le béton léger est défini comme un béton ayant une densité sèche inférieure à 2 000 kg/m3. Cependant, au cours des dernières décennies, le béton léger peut être fabriqué avec différentes densités (300 à 2 000 kg/m3) et des résistances correspondantes allant de 1,0 à 60 MPa [70]. C'est ainsi les termes descriptifs « structurel » et « infra structurel » ont dû être introduits. Selon l'Eurocode 2 [71], le béton structurel léger (SLWC) est défini comme un béton ayant une résistance à la compression cylindrique moyenne d'au moins 17 MPa et un poids unitaire d'au moins 800 kg/m3 [71]. Le préfixe latin « Infra » a été initialement proposé par le doyen du département de conception structurelle et de conception de l'université technique de Berlin en 2006 pour classer les nouveaux bétons légers d'une densité inférieure à 800 kg/m3 [72]. De nombreux chercheurs utilisent le terme « Ultra » au lieu du terme « Infra ». En revanche aux Pays-Bas, en raison de la température élevée résultant du processus d'hydratation, il est appelé "warmbéton" ou béton chaud [73]. En résumé, le béton infraléger (ILC), le béton ultraléger (ULWC) ou le "warmbeton" sont les bétons les plus modernes en termes de densité et de propriétés d'isolation et classent les bétons dont la densité est inférieure à 800 kg/m3.

2.12. Utilisation des bétons légers

L'utilisation de blocs LWC fait partie des activités de construction depuis des décennies. Aujourd'hui, le développement de nouveaux LWA permet d'utiliser les LWC dans des projets structurels où une réduction de la densité du béton est requise pour des raisons de conception et d'économie. Bicer et Kar et al.[74] ont rapporté que le béton léger en polystyrène expansé peut être utilisé pour produire des cloisons de bâtiments, des matériaux isolants, des revêtements de sol et des plafonds. Jo et ses collègues [75]ont souligné que le béton léger à base de cendres volantes activées par les alcalis peut être utilisé dans les structures de soutènement, les matériaux de remplissage pour béton à faible résistance et les matériaux de pavage. Le béton léger peut également être utilisé dans la construction de chaussées de ponts et de blocs de construction [75]. Oreshkin et al [76] ont utilisé du béton léger pour la production de linteaux de fenêtres et la construction de chalets. Des ponts de longue portée et des structures flottantes ont également été construits à l'aide de béton de granulats légers dans le passé [77]. Diverses études indiquent que le béton léger peut également être utilisé pour produire du béton structurel léger, de l'isolation thermique, des blocs de maçonnerie, des chaussées, des trottoirs, des glissières de sécurité, des bordures et des drains en béton [78-83]. Les différentes applications du béton léger sont résumées à la Figure 2-8[84].

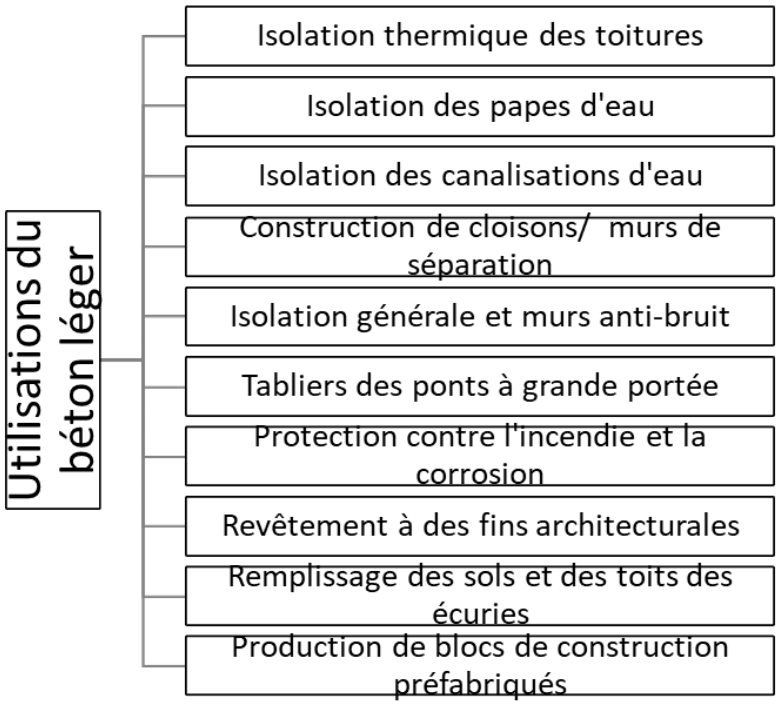


Figure 2-8 Utilisations des bétons légers

2.13. Exemples de construction en béton léger

2.13.1. Dans les bâtiments de grande hauteur[85]

L'utilisation du béton léger structurel dans les gratte-ciel a débuté avec le Dallas Statler-Hilton en 1955 (18 étages). Depuis, plusieurs bâtiments emblématiques ont suivi, notamment les tours jumelles de Marina City à Chicago (60 étages, 180 m, 1962), établissant un record pour les structures en béton armé. En 1967, une tour de l'Australia Square (184 m) à Sydney a battu ce record grâce à l'utilisation de coffrages préfabriqués en LWC, avant d'être surpassée par la Lake Point Tower (1968, 196 m, Chicago). Dans les années 1970, l'hôpital Guy's de Londres illustre une autre avancée avec l'emploi du LWC pour alléger les charges sur les fondations, tant dans les éléments structurels que dans les murs extérieurs. Les deux tours de 122 et 145 m ont utilisé du béton léger en agrégats expansés (Lytag) pour des planchers nervurés et des façades moulées sur place, avec une résistance de 31,3 MPa à 28 jours.

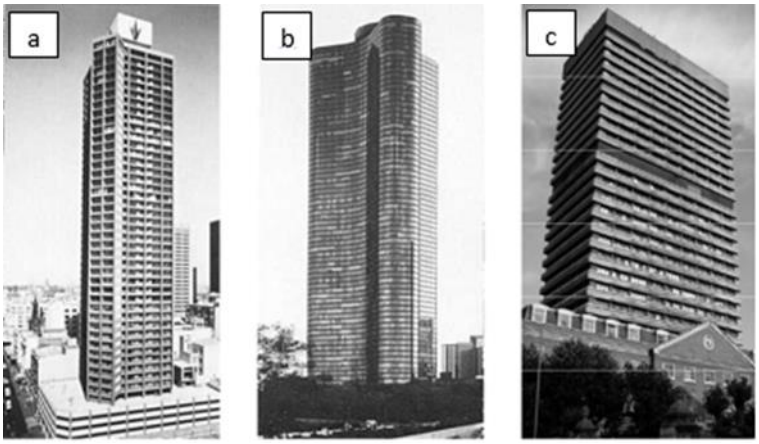


Figure 2-9 a) Park Regis, 1967, Sydney, Australia. b) Lake Point Tower, 1968, Chicago, USA. c) Guy's Hospital, 1971, London, United Kingdom [85]

2.13.2. Dans les ponts[85]

Un exemple d'utilisation du béton léger dans les ponts est celui du pont sur la rivière Sinigo, situé à Avelengo, en Italie. Ce pont, qui relie Merano à Avelengo à une altitude de 1250 m, devait franchir une portée totale de 125 m. La solution la plus économique aurait été une poutre continue sur quatre appuis, avec des travées de 31, 63 et 31 m, mais la forte inclinaison des pentes et l'absence de routes d'accès adaptées rendaient cette option irréalisable. Par conséquent,

le choix s'est porté sur une structure en arc à trois articulations, permettant de franchir la totalité de la portée sans nécessiter d'accès direct aux rives du canyon.

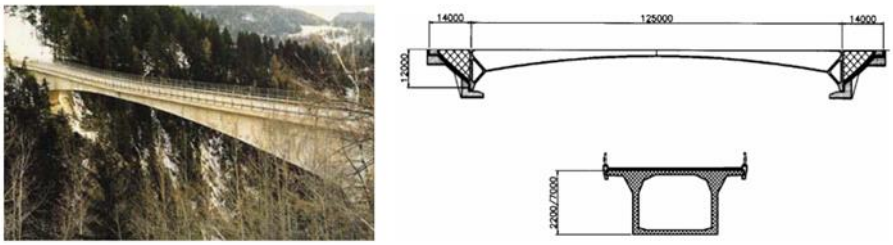


Figure 2-10 Details of bridge over river Sinigo at Avelengo, Italy [85]

2.13.3. Dans la préfabrication

Le bâtiment Standard Bank à Johannesburg (Figure. 2.11) mesure 139 m de hauteur et compte 30 étages. Le béton léger en agrégats a été utilisé dans les dalles de plancher afin de réduire les charges permanentes. Ces dalles ont été réalisées à l'aide d'éléments préfabriqués et l'agrégat utilisé pour le béton était de l'argile expansée [50].



Figure 2-11 Bâtiment de la Standard Bank de Johannesburg pendant et après la construction [85]

2.13.4. Applications du béton léger dans les structures marines[85]

Pendant la Seconde Guerre mondiale, l'agrégat en schiste expansé fut largement utilisé pour construire 104 navires en béton léger, bien plus que les 14 prototypes de la Première Guerre mondiale. Ces navires, avec des capacités allant de 3 200 à 140 250 tonnes, ont prouvé leur efficacité en zone de combat, offrant une bonne maniabilité et une grande résistance aux explosions proches. Des rapports indiquent qu'ils ont survécu à des impacts de bombes et d'obus sans subir de dommages structurels ni compromettre leur cargaison

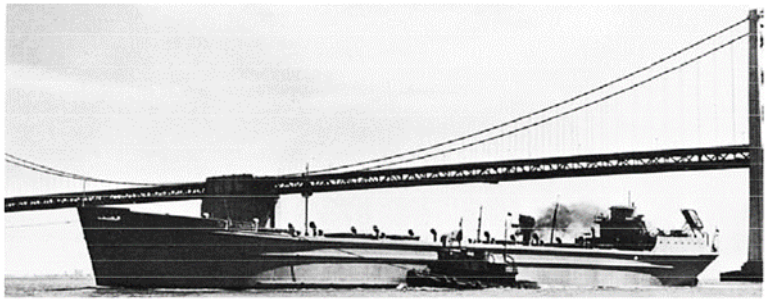


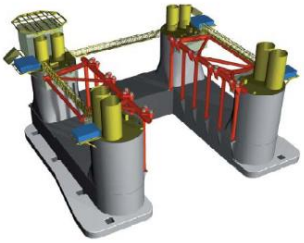
Figure 2-12 Navire en béton de la Seconde Guerre mondiale passant sous le pont San Francisco-Oakland Bay, San Francisco [85]

2.14. Applications récentes du béton léger et du béton infraléger

Les principaux facteurs motivant les ingénieurs et les architectes à poursuivre le développement du béton léger (LWC) sont les finitions apparentes de haute qualité, la construction monolithique en une seule couche, le poids réduit, la faible conductivité thermique, le coulage sur site, les techniques de construction simples, le coût abordable, les caractéristiques respectueuses de l'environnement et la recyclabilité. Ces efforts ont donné lieu à un certain nombre de nouveaux bâtiments en Suisse, aux Pays-Bas et en Allemagne, comme en témoignent les simulations virtuelles récentes. Le Tableau 2-3 présente un résumé de quelques-unes de ces constructions récentes remarquables.

Tableau 2-3 tableau représentant un résumé de quelques-unes de ces constructions récentes remarquables

Projet	Rc[MPa]	ρ [g /cm^3]
 Un immeuble résidentiel de cinq étages et trois travées, Pologne [86]	C30/37	/

  Grue lourde offshore MPU, Rotterdam, Pays-Bas., 2009 [85]	35/38	1 .58
  Schlaich Family House, Berlin, Germany, 2007 [85]	8/9	0.76
  Gartmann Family Hause, Chur, Switzerland, 2004 [85]	8/9	1.00
  German Technical Museum, Berlin, Germany, 2001 [85]	25/28	1.40

2.15. Conception du mélange et production du béton léger

2.15.1. Les granulats

La plupart des bétons légers utilisent une combinaison d'agrégats grossiers légers et de sable de poids normal. Le choix dépend de divers facteurs tels que la résistance spécifiée, la densité, la conductivité thermique et le prix du marché des agrégats. La qualité et la disponibilité des

granulats légers sont des facteurs supplémentaires qui influent sur le ratio optimal entre les agrégats de poids normal et les agrégats légers. Les agrégats légers fins sont souvent disponibles uniquement sous forme de matériau concassé, ce qui entraîne une demande élevée en eau et affecte les caractéristiques de mise en œuvre. Les exigences pour le sable de poids normal sont les mêmes que pour son utilisation dans le béton normal.

2.15.2. Les liants

Le béton léger (LC) peut être produit avec n'importe quel type de ciment disponible. Néanmoins, pour le LC fabriqué avec des granulats légers (LWA), il est fortement recommandé d'utiliser un ciment avec une libération de chaleur spécifique modeste, comme le ciment de haut fourneau, ou des ciments en combinaison avec des cendres volantes, de l'argile calcinée, du laitier des hauts fourneaux granulés ou du calcaire. Ces LC ont une faible conductivité thermique, ce qui pourrait entraîner des températures élevées dans le noyau de l'élément de construction pendant l'hydratation [87], dépassant ainsi la limite critique pour la formation retardée d'éttringite à 60°C–70°C [88]. L'ajout de matériaux cimentaires supplémentaires (SCM) est discuté de manière controversée. Demirboga et Gü. [89] ont observé une réduction de la résistance lors de l'utilisation de micro silice et de cendres volantes, qui ont également réduit la conductivité thermique d'environ 15 %, tandis que Chung et al [90] ont constaté des propriétés mécaniques et thermiques améliorées grâce à l'utilisation de cendres volantes ou de poudre de calcaire. Shafigh et al.[91] ont également étudié l'ajout de cendres volantes et de poudre de calcaire et ont noté que ce dernier améliorait la résistance à la compression du béton léger aux stades précoces et tardifs. De plus, Abd Elrahman et al. [92] ont mené des recherches expérimentales sur l'influence de la nano silice, qui a amélioré de manière significative les propriétés de résistance et de transport.

2.15.3. Eau de gâchage et adjuvants

Pour la production de béton léger (LC), tout type d'eau utilisé dans la production de béton normal peut également être utilisé. Cela inclut l'eau recyclée DIN EN 1008 [93]. De même, tout adjuvant utilisé dans la production du béton normal peut être utilisé pour le LC. Cependant, la compatibilité avec le liant et les granulats légers utilisés doit être vérifiée au préalable, comme pour le béton normal. Cela est particulièrement important pour les granulats légers qui peuvent

avoir des charges de surface différentes par rapport aux granulats de poids normal. Les granulats légers initialement secs ou seulement préhumectés absorberont des parties des adjuvants liquides s'ils sont ajoutés trop tôt au mélange. Pour éviter cette absorption, l'ACI 304R-00 [94] recommande l'utilisation de granulats légers préalablement saturés en eau. Un ajout différé des adjuvants liquides permettra de réduire ce problème [63].

2.15.4. Conception du mélange (malaxage)

Le dosage du mélange de béton léger doit toujours révéler l'eau ajoutée pour tenir compte de l'absorption d'eau des granulats légers, même si cette eau n'augmentera pas le volume du béton léger. Jusqu'à présent, il n'existe qu'une seule proposition sur ce sujet [95] qui recommande de considérer 70 % de l'absorption d'eau mesurée selon la norme DIN V 18004 [96]. Cette méthode d'essai sera adoptée dans la prochaine version de l'EN 1097-6 [97]. Ignorer l'absorption d'eau entraînera une absorption incontrôlée d'eau par les granulats légers et surtout par le sable léger, ce qui conduira inévitablement à la formation de microfissures graves dans la matrice [98] (Figure 2-13)[99] qui réduiront la résistance réalisable et compromettront la durabilité. Comme l'absorption se produit pendant l'étape plastique de la matrice de béton léger, elle ne peut pas être compensée par des effets de cure interne ultérieurs [100].

Le dosage des granulats légers doit être volumétrique chaque fois que cela est possible. Étant donné que dans la plupart des centrales à béton, le pesage gravimétrique est le seul disponible, la teneur en humidité et l'absorption des granulats légers [101], ainsi que leur masse volumique en vrac apparente, doivent être vérifiées à des intervalles appropriés et les changements pris en compte pour ajuster le dosage. Tous les autres composants sont mesurés comme d'habitude.

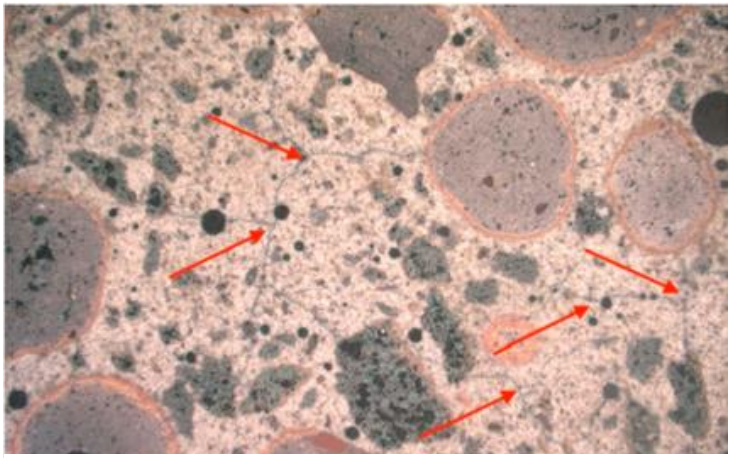


Figure 2-13 formation sévère de microfissures dans la matrice d'un béton léger à haute résistance due à l'absorption d'eau des granulats légers fins et grossier [99]

2.16. Méthode de malaxage

Pendant le malaxage, les granulats légers sont d'abord introduits. Jusqu'à deux tiers de l'eau de gâchage requise et l'eau compensant l'absorption sont ajoutés au malaxeur en marche et mélangés pendant environ 30 secondes. Cela est particulièrement important lorsque du sable léger est utilisé car il absorbe une quantité relativement importante d'eau. Si les granulats légers sont pré-humidifiés, ils doivent être aussi uniformément répartis que possible [102]. Ensuite, le ciment est ajouté dans le malaxeur, suivi du reste de l'eau du mélange. Les additifs en poudre sont ajoutés avec le ciment. Si de la fumée de silice est utilisée, elle doit être ajoutée soit sous forme de poudre avec d'autres additifs secs, soit sous forme de suspension avec le reste de l'eau de gâchage. De plus, les adjuvants doivent être ajoutés aussi tard que possible et, dans le meilleur des cas, avec le reste de l'eau de mélange pour éviter une absorption incontrôlée par les granulats légers. Le temps de malaxage minimum du béton léger structurel, après l'ajout de tous les constituants, doit être prolongé d'une plage de 30 à 60 secondes à 90 secondes, par rapport au béton normal.

2.17. Agro-composites pour les bâtiments

Divers termes tels qu’agro-composites, éco-matériaux et bio-composites sont couramment utilisés pour décrire un large éventail de composites dérivés de ressources de biomasse renouvelables, entièrement ou partiellement [103]. Au moment de décider de produire un composite à des fins de construction, il est crucial de considérer à la fois l'application prévue et les caractéristiques souhaitées, tout en prenant également en compte les aspects écologiques (tels que la biodégradabilité et la recyclabilité) et les facteurs économiques (y compris la disponibilité du matériau primaire et le processus de fabrication).

2.18. Béton Léger à base de bille de polystyrène

2.19. Le polystyrène

Le polystyrène est fabriqué en polymérisant le styrène, qui lui-même est obtenu par l'action du benzène sur l'éthylène lorsqu'il est soumis à une décomposition thermique Figure 2-14[10] . Le polystyrène ramollit à une température d'environ 120°C, fond à moins de 160°C (car il est amorphe) et se volatilise entre 470 et 500°C [104]. Il existe trois variantes de polystyrène :

Le polystyrène cristal ou dense.

Le polystyrène choc ou haut impact.

Le polystyrène expansé (EPS).

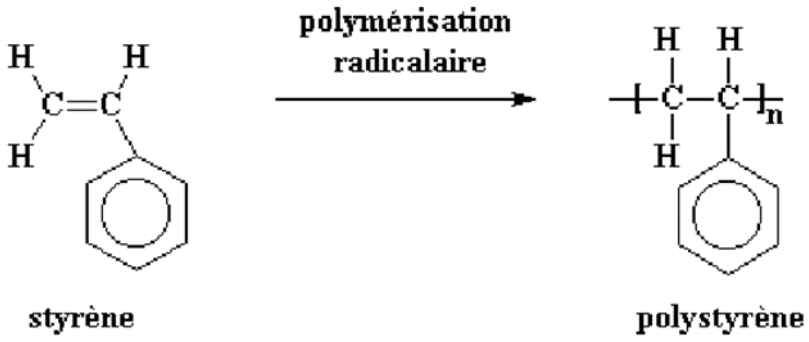


Figure 2-14 polymérisation du styrène [10]

Le polystyrène expansé est créé par polymérisation du styrène (C8H8) à l'aide d'un agent gonflant, généralement du pentane (C5H12). Le processus d'expansion implique l'utilisation de la vapeur. Le polystyrène expansé contient environ 95% ou 98 % de gaz, avec seulement 5% ou 2 % de polystyrène. Ce produit polyvalent est largement utilisé dans les industries de la construction et de l'emballage pour ses propriétés d'isolation thermique exceptionnelles (≤ 0,04 W/(m.K)) et sa densité de 20 ± 5 kg/m3 [105].

Selon Doroudiani et Omidian [106], au cours de ce processus, le gaz interne des billes subit une expansion de volume qui génère une structure cellulaire pénétrable par l'air. Ce processus est réalisé dans des silos aérés lors de l'affinage intermédiaire du matériau.

Les billes atteignent une plus grande élasticité mécanique et une capacité d'expansion améliorée. À travers le processus d'expansion, les billes pré-expansées stabilisées sont moulées et exposées à nouveau à la vapeur afin de les lier. Les blocs créés selon ce processus sont encore améliorés en termes de stabilité dimensionnelle avant d'être séparés dans la forme requise. La Figure 2-15[107] montre les trois principales formes de EPS. De plus, une mousse de polystyrène à l'état solide peut être fabriquée [108, 109]. Dans le processus d'extrusion, du dioxyde de carbone ou de l'azote est utilisé pendant la polymérisation en suspension comme agent d'expansion [110]. Des études ont montré que les EPS composites à base d'amidon et de cellulose sont plus susceptibles de substituer les EPS en raison de leurs caractéristiques respectueuses de l'environnement [111].

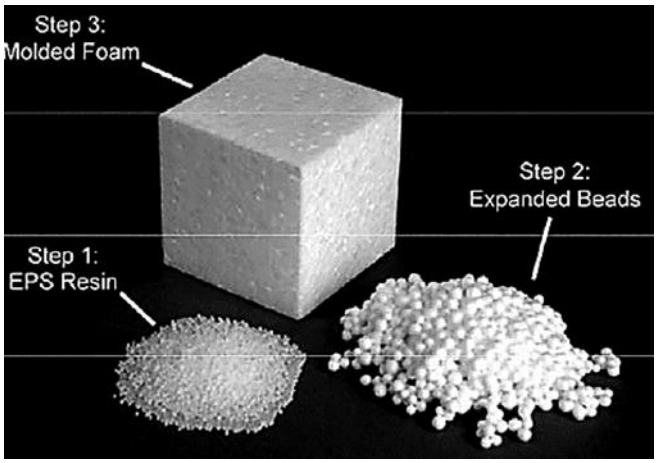


Figure 2-15 Trois formes importantes d'EPS. Les perles formées par expansion de la résine sont moulées dans la forme souhaitée

2.20. Avantages du béton de polystyrène

- Extrêmement léger, probablement parmi les bétons les moins denses.
- Sa faible capacité d'absorption d'eau est remarquable.
- Doté d'une durabilité exceptionnelle, il résiste aux agressions extérieures.
- Sa mise en œuvre est simple et suit des méthodes traditionnelles, ne nécessitant pas de vibration.
- Il impose moins de contraintes de poids par rapport au béton conventionnel.
- Résiste efficacement aux chocs.
- Réputé pour offrir les meilleures performances thermiques et acoustiques parmi les matériaux disponibles.
- Non sujet à la pourriture

2.21. Caractéristiques physiques et mécaniques du polystyrène

2.21.1. Densité

La densité du polystyrène à l'état brut avoisine les 1000 kg/m3 [111]. Cette densité diminue considérablement lorsque le polystyrène est expansé, se situant entre 8 et 80 kg/m3. Cette différence notable est attribuable à la présence d'air dans le polystyrène expansé, le volume de polymère restant très faible par rapport au volume d'air. Par exemple, pour une densité de 32 kg/m3, le polystyrène occupe seulement 2,5% du volume total, mais représente 92% de la masse totale du polystyrène expansé [112]. En général, la densité sèche est inférieure à 50 kg/m3. De plus, pour les granulats expansés, la densité dépend de la taille des billes : plus les billes sont grandes, plus leur densité est faible. Par exemple, pour un diamètre de 1 mm, la densité est de 33 kg/m3, de 19 kg/m3 pour un diamètre de 2,5 mm et de 17 kg/m3 pour un diamètre de 6,3 mm [113].

2.21.2. Propriétés morphologiques

Les billes de polystyrène sont parfaitement sphériques, ce qui les rend conformes aux modèles d'empilement classiques. Lorsqu'elles sont coupées, les billes révèlent une structure alvéolaire avec une enveloppe constituée de deux membranes, Figure 2-16 [114] . Cette caractéristique explique à la fois leur extrême légèreté et leur totale imperméabilité à l'eau. En effet, des essais menés par Yamura et al. [115] ont démontré qu'après un mois d'immersion dans l'eau, les billes de polystyrène n'avaient pas absorbé d'eau. De plus, ces billes sont hydrophobes et présentent des charges électrostatiques en surface.

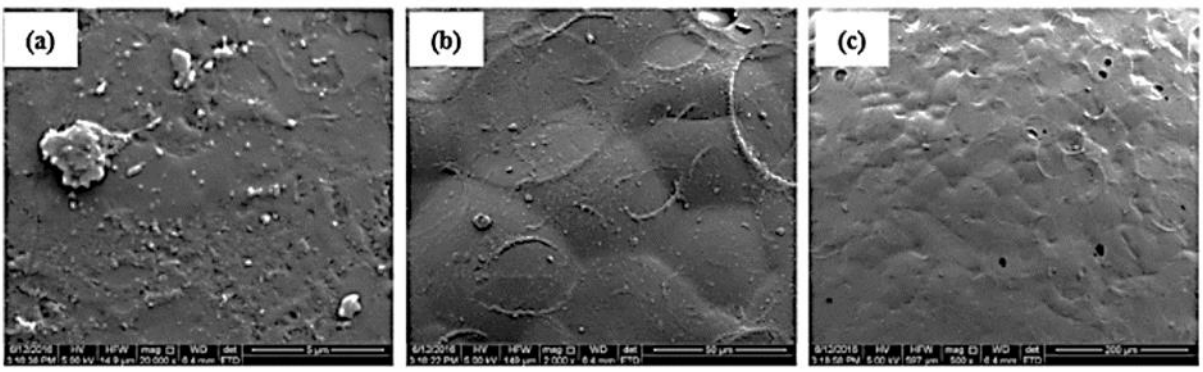


Figure 2-16 L'apparence microscopique de l'EPS (a)×20000 ; (b)×2000 ; (c)×500 [114]

2.21.3. Résistance à la compression du polystyrène

La résistance à la compression du polystyrène est principalement influencée par sa densité. En effet, plus le polystyrène est dense, plus sa résistance à la compression est élevée. Toutefois, en raison de sa flexibilité, le comportement du polystyrène est assez complexe [112].

Le Tableau 2-4 [112] présente quelques valeurs de résistance à la compression du polystyrène expansé en fonction de sa densité, pour une déformation de 10%, conformément à la norme NF-T56-201[116].

Tableau 2-4 Valeurs de la résistance en compression du PSE en fonction de sa densité [112]

Référence	Classe Q1	Classe Q2	Classe Q3	Classe Q4	Classe Q5
Masse volumique (kg/m3)	9	13	16	20	25
Contrainte (MPa)	0.03	0.6	0.9	0.12	0.15

Il convient de noter que les propriétés mécaniques des billes de polystyrène expansé sont négligeables par rapport à celles de la matrice cimentaire. En effet, ces billes présentent un module d'Young compris entre 4 et 8 MPa et une résistance à la compression d'environ 80 kPa [113].

2.21.4. Conductivité thermique

Le polystyrène est largement reconnu pour ses performances thermiques, ce qui en fait un matériau très utilisé dans l'isolation thermique des constructions, souvent sous forme de panneaux de 5 cm d'épaisseur placés entre deux parois [117]. La conductivité thermique du polystyrène est influencée par sa porosité, laquelle dépend du procédé d'expansion utilisé. Étant donné que la mousse de polystyrène expansé (EPS) est composée à 98 % d'air et à 2 % de polystyrène en volume, son bon coefficient d'isolation thermique découle de la présence d'air emprisonné dans ses cellules [118].

Généralement, la conductivité thermique du polystyrène varie entre 0,027 et 0,037 $W.m^{-1}.K^{-1}$. Ces valeurs sont parmi les plus basses de tous les matériaux en termes de conductivité thermique [119].

2.22. Applications du béton de polystyrène

Le béton incorporant du polystyrène expansé (EPS) gagne en popularité et trouve diverses applications dans l'industrie de la construction. Cette tendance s'explique en partie par sa masse volumique réduite et ses meilleures performances en termes de résistance thermique et acoustique. Ses utilisations sont variées, allant des constructions traditionnelles telles que les maisons et les bâtiments, à la construction routière où il est utilisé comme matériau de sous-couche, ainsi qu'aux structures flottantes et offshore, et aux ouvrages nécessitant une capacité d'absorption d'énergie en cas de charges d'impact [120]. Ces dernières années, le béton EPS, doté de propriétés mécaniques et de durabilité adéquates, est envisagé pour des applications plus exigeantes telles que les grands immeubles, les structures en béton de grande portée comme les ponts, ainsi que dans des applications structurelles telles que les matériaux de toiture, les panneaux et les éléments porteurs de charge. De plus, il peut être intégré dans des barrières en béton pour réduire les risques de blessures lors d'accidents routiers [121, 122].

2.23. Caractéristiques physico-mécaniques des bétons de polystyrène

Les caractéristiques internes du béton de polystyrène expansé (EPS) sont influencées par divers paramètres, de manière similaire aux bétons légers. En raison des variations dans la matrice, la porosité et la composition chimique, les propriétés physiques et mécaniques des bétons de EPS peuvent varier considérablement. Ces variations sont dues à des facteurs tels que la taille, la proportion des billes de EPS dans le mélange, la composition de la matrice cimentaire, l'ajout de minéraux, les conditions environnementales agressives et les températures élevées.

2.23.1. Effet de taille des billes de EPS

L’impact de la taille des billes de PSE sur les propriétés mécaniques du béton de polystyrène expansé a été largement étudié dans la littérature. Laukaitis et al.[118] ont découvert une diminution notable de la résistance à la compression lorsque la taille des billes de polystyrène

augmentait. De même, Parant et Le Roy ont observé une baisse significative de 50 % de la résistance du béton léger lorsque des billes de 1 mm de diamètre étaient remplacées par des billes de 6 mm de diamètre (Figure 2-17)[123]. Milled et coll ont en outre été établi que cet effet de taille est influencé par la macroporosité du béton, diminuant progressivement à mesure que la porosité augmente et disparaissant presque aux porosités élevées [124]. Par conséquent, la réduction de la taille des billes de polystyrène dans le béton EPS léger entraîne une augmentation substantielle de la résistance à la compression tout en conservant la même densité du béton.

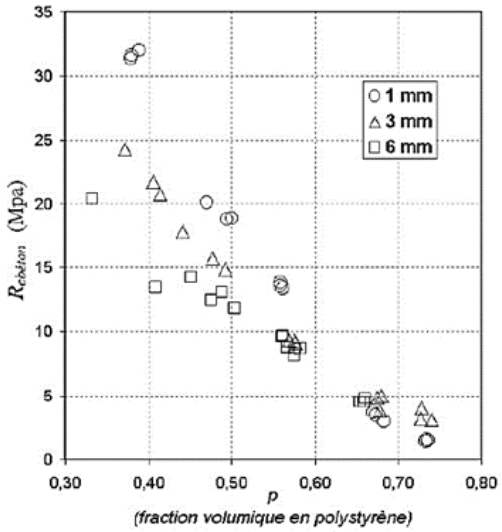


Figure 2-17 Effet de taille sur la résistance en compression du béton léger de polystyrène expansé [123]

2.23.2. Effet du dosage en ciment (matrice cimentaire)

Kuhail et Shihada [125] ont développé plusieurs types de mortiers à base de polystyrène expansé. Il affirme que l'augmentation de la teneur en ciment entraîne une augmentation de la résistance mécanique. Cet effet de la teneur en ciment est clairement visible à partir des lignes de tendance présentées dans la Figure (2-18)[125]. La résistance à la compression peut atteindre jusqu'à 200 kg/cm² lorsque la proportion de polystyrène est relativement faible et la teneur en ciment relativement élevée (600 kg/m3), ce qui donne une densité d'environ 1550 kg/m³. Par exemple, pour un rapport P/S (polystyrène/ciment) de 5 et une teneur en ciment de 600 kg/m³, la résistance obtenue est de 15 N/mm² avec une densité de 1200 kg/m³. Ces résultats suggèrent que ce mélange peut être utilisé aussi bien pour des éléments structuraux que non structuraux, et pour des éléments porteurs et non porteurs.

L'utilisation de matrices cimentaires à ultra haute résistance est essentielle lorsque des billes de polystyrène expansé sont utilisées comme granulats, car leur présence entraîne une chute abrupte de la résistance [124].

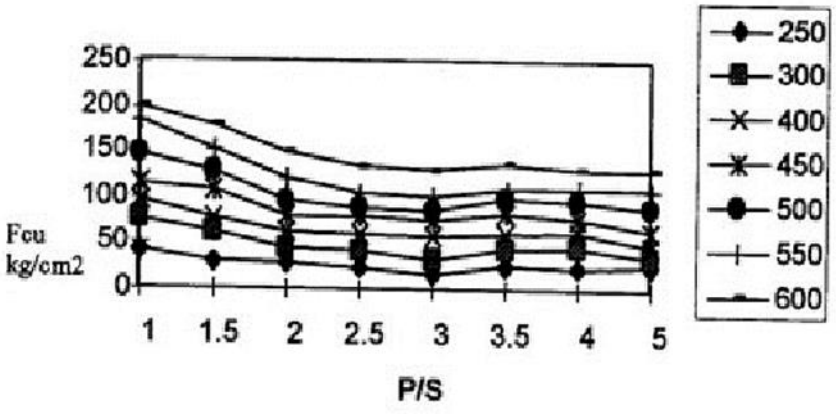


Figure 2-18 Evolution de la résistance à la compression en fonction du rapport polystyrène/sable pour les différentes quantités du ciment [125]

2.23.3. Effet des additions minérales

De manière générale, l'utilisation d'additifs minéraux dans la fabrication des mortiers et bétons a pour but d'améliorer certaines propriétés et notamment de contribuer à modifier le processus d'hydratation du ciment. De plus, l'ajout de ces additifs minéraux peut également entraîner des modifications dans la répartition des particules. La fumée de silice est largement utilisée dans la fabrication de bétons à hautes performances.

Ganesh et Saradhi Babu [126] ont observé l'effet de la fumée de silice sur le béton de polystyrène expansé. Ils ont produit 3 séries de bétons avec différents dosages de ciment, différents taux de remplacement du ciment à la fumée de silice et différents ratios eau-ciment. La résistance à 28 jours de ces bétons variait entre 10 et 21 MPa. Ces auteurs ont démontré qu'une dose accrue de fumée de silice entraînait une plus grande amélioration de la résistance à la compression à 7 jours qu'à 28 et 90 jours, c'est-à-dire que la fumée de silice accélérait l'hydratation du béton. Par conséquent, étant donné que la résistance du béton EPS est perdue en raison de l'inclusion de granulats de polystyrène, de la fumée de silice est ajoutée pour augmenter la résistance de ces bétons.

À l'inverse, les recherches sur les cendres volantes comme substitut partiel au mortier ont démontré que leurs avantages sont modestes. Costin Andrei Cadere et al. [127] ont étudié l'effet de l'inclusion de cendres volantes (10 %) et de sphères de polystyrène comme substitut à la

densité et aux propriétés mécaniques du béton (compressibilité, aptitude à la flexion et résistance à la traction). Ils ont conclu que les sphères de polystyrène diminuent le volume du béton et réduisent également la résistance de tous les autres types de béton, à l'exception de la résistance à la traction. Ils ont découvert que le volume de béton contenant des cendres volantes et des billes de polystyrène diminuait entre 1 880 et 2 131 kg/m3. Toutes les valeurs sont inférieures à la concentration initiale du mélange témoin, qui était de 2 250 kg/m3(Tableau 2-5)[127].

Tableau 2-5 Densité des bétons de EPS [128]

Mélanges de bétons	**Densité (Kg/m³)**
CC1	2250
FACC1	2134
FACC2	2076
FACC3	1997
FACC4	1942
FACC5	1880

2.23.4. Densité du béton de EPS

La densité, l'un des éléments fondamentaux, peut influencer diverses caractéristiques physiques du béton à poids léger (LWC) et est principalement déterminée par le volume et la densité des agrégats légers [128]. Les propriétés de densité du béton sont soumises à plusieurs facteurs, notamment la composition des matériaux, les proportions du mélange, les techniques de compactage et l'utilisation éventuelle d'adjuvants minéraux et chimiques) [129] . Les normes ASTM et ACI définissent le béton à poids léger structural (SLWC) comme ayant une densité inférieure à 2000 kg/m³. Selon Neville [130], la plage de densité recommandée pour le LWC se situe entre 350 et 1850 kg/m³. La norme BS EN 206-1 [67] stipule que la densité du LWC doit être comprise entre 800 et 2000 kg/m³. Les recherches menées par Herki et Khatib [131] sur le béton léger autoplaçant (SPS LWAC), présentant des densités allant de 891 à 1961 kg/m³ avec des niveaux de remplacement des agrégats légers à base de EPS de 30% à 100%, confirment qu'il peut être considéré comme du LWAC. Cette conclusion est également appuyée par Sayadi et al. [132].

2.23.5. Résistance à la compression

La résistance à la compression du béton est une propriété cruciale, mais lorsqu'on incorpore du polystyrène expansé (EPS), elle a tendance à diminuer en raison d'une faible liaison entre l'EPS et la pâte de ciment, ainsi que de la nature hydrophobe et de la résistance mécanique de l'agrégat EPS. Kan et Demirboğa [133] ont proposé que le chauffage des particules d'EPS à 130°C pendant 15 minutes ou la réduction de leur taille peut améliorer la résistance du béton. Typiquement, la résistance à la compression à 28 jours varie de 12,58 à 35 MPa. Ces résultats sont en accord avec des études similaires [118, 123] où les tailles de billes EPS variaient de 2,5 à 6,3 mm et les densités de 150 à 300 kg/m3.

Il est important de noter que la manière dont le stress est transféré dans le béton EPS (polystyrène expansé) diffère significativement de celui dans le béton de poids normal (NWC). Les agrégats EPS présentent une rigidité inférieure par rapport au mortier, ce qui entraîne une distribution de contraintes variée dans le béton par rapport au NWC. De plus, le motif de rupture et la zone de transition interfaciale (ITZ) dans le béton EPS diffèrent de ceux du NWC. Dans le NWC, la rupture se produit généralement autour des particules d'agrégats en raison de la résistance à la traction plus élevée des agrégats par rapport au mortier environnant, tandis que dans le béton EPS, ce motif n'est pas observé. Ces résultats concordent avec diverses études, y compris celles de Bogas & Gomes [134] et Sayadi et al. [132].

2.23.6. Résistance à la traction par fendage

L'inclusion de granulats EPS dans le béton entraîne une diminution de sa résistance à la traction par fendage, un phénomène similaire aux facteurs influençant la réduction de la résistance à la compression. Des recherches menées par Ganesh Babu et al. [128] se sont penchées sur les tests de résistance à la traction par fendage du béton infusé de granulats EPS, révélant une défaillance localisée en comparaison de la séparation typique en deux parties observée dans le béton de poids normal. Notamment, une augmentation de la résistance à la compression est corrélée à une augmentation de la résistance à la traction par fendage. Les équations conventionnellement utilisées pour relier la résistance à la traction par fendage et la résistance à la compression, telles que celles pour le béton de poids normal (ft = 0.2f 0.7cu) et le béton léger (ft = 0.23f 0.67cu), se sont révélées sous-estimer les résistances à la traction par fendage des bétons EPS. En guise de remède, ils ont proposé une équation alternative : ft = 0.358f 0.675cu. La diminution de la résistance à la compression due à l'application d'EPS reflète celle de la résistance à la compression.

2.23.7. Conductivité thermique

En raison de la hausse des coûts énergétiques associés aux bâtiments, l'isolation thermique des matériaux de construction est devenue un sujet de préoccupation mondial important. L'utilisation de béton léger à agrégats (LWAC), tel que le béton EPS, a gagné en importance dans l'industrie de la construction principalement en raison de sa faible conductivité thermique. La conductivité thermique du béton est influencée par divers facteurs, notamment les caractéristiques des agrégats (telles que les propriétés physiques et minéralogiques), ainsi que des paramètres tels que la teneur en humidité, la densité et la température [135].

De plus, le régime de durcissement et le degré de compactage jouent un rôle significatif dans la détermination de la conductivité thermique du béton. Sayadi et al. [132] ont observé qu'augmenter le volume d'EPS entraîne une réduction de la conductivité thermique en raison des propriétés thermiques de l'agrégat EPS, qui comprend environ 98 % d'air. Par exemple, les compositions de béton avec 82 % et 28 % d'EPS ont présenté des conductivités thermiques de 0,0848 et 0,212 W/mK, respectivement.

De nombreux chercheurs, dont Demirel [136] et Demirboga et Kan [135], ont étudié la détermination des dimensions physiques et des types de matériaux d'isolation thermique. En particulier, Demirboga et Kan [135] ont étudié l'impact du polystyrène expansé modifié (MEPS) sur la conductivité thermique du béton. Ils ont noté une diminution significative de la conductivité thermique avec une augmentation de la teneur en MEPS. De plus, ils ont constaté que la conductivité thermique du béton MEPS diminuait avec la diminution de la densité du béton. Par conséquent, la conductivité thermique du béton MEPS s'est avérée être directement proportionnelle à la fois à la densité du béton et à la teneur en agrégats MEPS. Notamment, une forte corrélation existe entre la densité du béton (γ) et la conductivité thermique (λ), indiquant la possibilité d'estimer la conductivité thermique du béton EPS en fonction de sa densité. Ils ont recommandé d'utiliser deux équations à cette fin.

$$\lambda = 0.193e^{0:146\,\gamma}$$

$$\lambda = 0.303e^{0:965\,\gamma}$$

2.23.8. Absorption capillaire

Les caractéristiques de durabilité du béton incorporant du polystyrène expansé (EPS) sont remarquables. L'absorption capillaire d'eau (CWA) dans le béton fait référence au processus par lequel l'eau pénètre à travers ses capillaires [137] et Babu et al. [128] ont observé que lorsque les billes de EPS subissent un retrait, la capillarite du béton a tendance à augmenter parallèlement à une augmentation de la teneur en EPS.

Des études récentes indiquent une corrélation entre une teneur plus élevée en EPS traité (entraînant une densité du béton réduite) et une absorption accrue de l'eau lors des tests capillaires [138]. Néanmoins, il n'y a pas de divergence significative de capillarité parmi les mélanges de béton avec des quantités variables d'agrégats EPS traités dans la période initiale de 5 minutes. La recherche de Herki [138] met en évidence que le béton avec une teneur plus élevée en EPS traité présente une absorption d'eau accrue. Ce phénomène peut être attribué à la zone de transition interfaciale (ITZ) hautement poreuse entre le EPS et son revêtement, ainsi qu'à la haute porosité du matériau de revêtement, car l'agrégat EPS lui-même présente une absorption d'eau minimale.

2.23.9. Perméabilité

En général, la pénétration des substances agressives à travers les pores du béton impacte significativement diverses caractéristiques de durabilité [126, 139] ont étudié les propriétés de durabilité du béton léger (LWC) incorporant un agrégat en polystyrène expansé (EPS). La densité du LWC variait de 550 à 2200 kg/m3, avec un remplacement de l'agrégat naturel par l'agrégat EPS de 0% à 95%. Leurs conclusions indiquaient que la perméabilité du béton EPS avec une résistance et une densité plus élevées (par exemple, 1500 kg/m3) ressemblait à celle du (NWC). L'absorption d'eau à 30 minutes variait entre 2,2% et 11,5%, tandis que l'absorption totale d'eau se situait entre 6,7% et 28,8% [140]. De plus, dans leur étude, la perméabilité aux chlorures du béton EPS avec une résistance et une densité plus élevées (par exemple, 1500 kg/m3) était comparable à celle du NWC, mais elle présentait une réduction de 50% à 65% par rapport au NWC.

2.23.10. Résistance au feu

Dans l'étude menée par Fernández-Mas et García-Alcocel [141], il a été découvert que le polystyrène expansé (EPS) a un impact bénéfique sur la résistance à la compression des mortiers exposés à des cycles de chaleur. Cet effet est probablement attribué à des améliorations à la fois dans l'interface entre la pâte de ciment et l'EPS, ainsi qu'à l'intérieur de la pâte de ciment elle-même. De même, Sayadi et al. [132] ont étudié la résistance au feu du béton incorporant des proportions variables d'EPS. Leurs résultats ont révélé que les spécimens avec une teneur en EPS plus élevée présentaient une résistance au feu réduite en raison d'une augmentation de la rétraction au sein de la matrice, contrairement aux mélanges de béton contenant de plus faibles quantités d'EPS.

2.24. Recyclage et Traitement du EPS

La méthode la plus rentable pour utiliser les déchets de polystyrène expansé (EPS) dans le béton semble impliquer l'incorporation directe de déchets de EPS déchiquetés non modifiés dans le béton ou le mortier en tant qu'agrégat léger (LWA). Cette approche offre des avantages significatifs en réduisant le volume de déchets destinés aux décharges et en remplaçant partiellement les matériaux vierges extraits de carrières. Cependant, les agrégats de EPS sont légers et peuvent entraîner une ségrégation lorsqu'ils sont mélangés dans le béton. Par conséquent, diverses méthodes de traitement des agrégats de EPS doivent être explorées pour minimiser la ségrégation dans le béton léger. Les options de traitement peuvent inclure l'ajout d'agents de liaison, le traitement thermique et le revêtement.

Plusieurs études ont examiné les billes de polystyrène expansé (EPS) avec des traitements thermiques, de densification et chimiques pour améliorer la qualité du béton. Wibowo et al. [142] ont étudié les billes de polystyrène expansé chauffées à des températures comprises entre les points de ramollissement et de fusion pendant environ 15 minutes, puis mélangées avec la pâte de ciment fraîche. Leurs résultats ont montré que les billes de polystyrène expansé chauffées avaient une microstructure modifiée, permettant de réduire la taille des pores et de rendre la surface plus rugueuse. La résistance à la compression du béton aux billes de polystyrène expansé chauffées était supérieure à celle du béton EPS normal, mais la densité du béton aux billes de polystyrène expansé chauffées était également plus élevée que celle du béton normal. Bien que les auteurs aient signalé une amélioration grâce à l'utilisation de polystyrène expansé chauffé dans le béton, la performance globale restait incertaine. De plus, Herki [138]

a développé le processus de densification des billes de polystyrène expansé en les enduisant d'un mélange de ciment contenant 10 % en poids d'argile. Les billes de polystyrène expansé densifiées étaient ensuite ajoutées à des mélanges de béton frais avec ou sans cendres volantes. Les mélanges de béton avec des billes de polystyrène expansé densifiées avaient une absorption d'eau capillaire et une absorption d'eau plus élevées, ce qui conduisait à une réduction de la résistance à la compression. L'auteur a suggéré que le processus de densification des billes de polystyrène expansé pourrait éventuellement être adopté dans le béton, mais des investigations supplémentaires, y compris des tests mécaniques et de durabilité, étaient nécessaires pour le déterminer.

Major et Halbiniak [143] ont étudié les billes de polystyrène expansé revêtues chimiquement avec une boue de ciment contenant de la poussière de silice, puis mélangées avec le mélange de béton frais. Ils ont constaté que le processus de revêtement améliorait l'adhérence entre la surface de la bille de polystyrène expansé et la pâte de ciment. Par conséquent, les bétons aux billes de polystyrène expansé revêtues chimiquement avec de la boue de ciment et de la poussière de silice avaient une résistance à la compression supérieure d'environ 15 % à 18 % à celle du béton EPS normal. De plus, en 2022, Wibowo et al. [144] ont étudié les billes de polystyrène expansé revêtues avec de la poussière de four à ciment, de l'acétone et de l'acétate de polyvinyle. Les auteurs ont mentionné que ce processus augmentait significativement les performances en résistance du béton par rapport à celui contenant des billes de polystyrène expansé de référence. En résumé, la méthode de prétraitement supplémentaire des billes de polystyrène expansé, comme le revêtement chimique avec du ciment et de la poussière de silice, peut entraîner une amélioration des performances du béton, mais d'autres moyens de prétraitement tels que le chauffage et le revêtement avec du ciment et de l'argile suscitent encore des doutes quant à leur capacité à améliorer les performances des produits de béton finaux [145].

Il est important de peser soigneusement les avantages et les inconvénients de chaque méthode de traitement. Certaines techniques peuvent ne pas être économiquement viables, efficaces, facilement applicables, disponibles dans les pays en développement, ou respectueuses de l'environnement, car l'utilisation de matériaux de déchets dans ces régions en est encore aux premiers stades de développement (Tableau 2-6)[146].

Tableau 2-6 Etudes antérieures sur le béton léger en EPS [147]

Références	**Mélanges**	**Densité**	**Résistance à la compression (MPa)**	
			7jours	**28 jours**
Herki et al. (2013) [131]	SPS+NA+FA+C	1291-1788	1.62-5.14	2.95-7.94
Liu et Chen (2014) [147]	EPS+SF+NA+C	1124-1900	3.8-23.2	6.1-30.0
Cui et Kar (2016) [148]	EPS+NA+C	793-1190	/	3/8-6.24
Sayadi et al. (2016) [132]	EPS+NA+FA+C	150-437	/	0.08-1.0
Fathi et al.(2017) [149]	EPS+LWA+C	1565-1780	11.0-20.0	18.0-30.0
Fernando et al (2017).[150]	EPS+NA+FA+C	629-738	2.13-4.06	/
Nikbin et Golshekan(2018) [121]	EPS+NA+SF+C	1611-2312	/	12.4-47.8

C, ciment; EPS, polystyrene expansé; FA, cendres volantes; MEPS, polystyrene expansé modifié; NA, franulats naturels (fins et grossiers); SBR, caoutchouc styrène-butadiène; SF, fumée de silice

L'intérêt de la recherche dans le béton à agrégats légers (LWAC) incorporant des EPS a augmenté ces dernières années. Néanmoins, il subsiste d'importantes lacunes dans la compréhension des propriétés et du comportement du béton EPS. Un facteur contributif est la variabilité substantielle des propriétés du béton EPS, qui dépendent de facteurs tels que le type d'EPS et la méthode de recyclage des EPS de rebut utilisée. Par conséquent, toutes les conclusions tirées de ces études ne peuvent être applicables qu'à des scénarios et des applications spécifiques [146].

2.25. Béton Léger à base de bois

2.26. Le bois

Le bois, en tant que ressource naturelle renouvelable, est généralement un matériau dérivé de biomasse non toxique, facilement accessible et peu coûteux. Depuis l'Antiquité, l'homme utilise le bois en raison de ses propriétés inhérentes, en choisissant des parties spécifiques d'arbres de certaines espèces disponibles localement pour obtenir les meilleures performances dans la construction, pour fabriquer différents types d'outils ou pour des usages autres que les tâches pratiques de la vie quotidienne. Cependant, étant un produit naturel provenant de différents arbres individuels, des limites sont imposées à son utilisation, et le matériau doit être transformé pour acquérir la fonctionnalité souhaitée. Cela est devenu de plus en plus évident à l'ère moderne et hautement industrielle. Ainsi, des modifications sont appliquées pour surmonter les faiblesses du bois, principalement liées à la sensibilité à l'humidité, à la faible dureté et résistance à l'usure, aux attaques de parasites marins et à la faible résistance aux rayons UV [151].

2.27. Microstructure du bois

La structure du bois est le résultat de l'exigence de l'arbre vivant. Le xylème est la partie de l'arbre qui, dans le langage courant, est appelée bois et se compose de tubes creux (cellules) d'une longueur de quelques millimètres reliés les uns aux autres.

La structure cellulaire du bois est généralement classée comme une microstructure car les unités structurelles sont à une échelle de quelques millimètres à quelques micromètres. Le bois des conifères (des espèces telles que les sapins, les pins, les épicéas, les cyprès et les séquoias) se compose de deux types de cellules : les trachéides longitudinales et le parenchyme rayonnant, orientés à la fois axialement et horizontalement. La plupart des trachéides sont longitudinales, tandis que les cellules du parenchyme ont une orientation radiale. En plus de ces deux types de cellules, d'autres éléments, tels que les cellules épithéliales, constituent des canaux de résine longitudinaux et horizontaux. Les trachéides transversales ne sont pas présentes dans toutes les espèces. Les différents types de cellules du bois de conifères sont présentés dans la Figure 2-19[151].

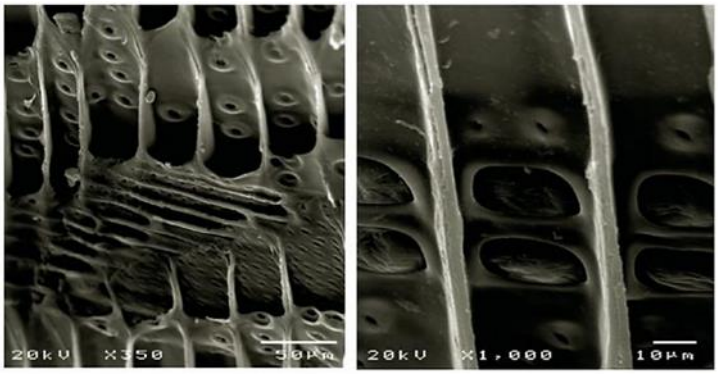


Figure 2-19 microstructure du bois [151]

2.28. Composition chimique du bois

Les fibres naturelles du bois sont principalement constituées de trois composantes, à savoir la cellulose, hémicelluloses et lignine, ainsi que certains composés inorganiques. La proportion de ces composants varie selon le type de fibre naturelle (comme le jute, le bois, le sisal, etc.) Tableau 2-7 [151]. Chaque fibre est un composite multicouches où la lignine agit comme une matrice entourant la cellulose [152], qui est l'élément structurant principal et très rigide.

Tableau 2-7 Composants chimiques du bois, leur nature polymérique et leurs fonctions [151]

Composant	Composition (% volume)	Nature polymérique	Degré de polymérisation	Monomer basic	Fonction
Cellulose Hémicellulose Lignine Extraits Cendres	40-50 20-25 20-30 0-10 0-5	Molécule linéaire semi-cristalline Molécule amorphe ramifiée Liaison amorphe tridimensionnelle Molécule polymérisée Minéraux	5000-10000 150-200 - - -	Glucose Sucre essentiel Phénylpropane Polyphénol -	Fibre Matrice Matrice Element de protection -

2.28.1. La cellulose

La cellulose représente environ 43 % de la masse totale, ce qui en fait le principal composant. Elle constitue les micro-fibrilles qui composent la paroi cellulaire et renforcent le composite cellulosique. D'après Morsing et Hoffmeyer [153], les liaisons covalentes à l'intérieur et entre les cycles de glucose renforcent l'élasticité et la résistance à la traction axiale du bois.

2.28.2. L’hémicellulose

Les hémicelluloses, majoritairement composées de glucose, mannose et xylose, présentent un degré de polymérisation variant de 150 à 200. Ces polymères, en comparaison avec la cellulose, ont une masse moléculaire significativement plus faible [154]. Selon Morsing et Hoffmeyer [153], le principal constituant des hémicelluloses dans le bois de feuillus est le xylane, caractérisé par une acétylation partielle des groupes O-H. Leur structure ramifiée et hétérogène confère aux hémicelluloses un caractère amorphe, leur permettant un accès aisé aux sites O-H et à d'autres groupes réactifs. De ce fait, les hémicelluloses sont hygroscopiques et sujettes à la dégradation thermique. Elles confèrent aux fibres la résistance aux chocs, à la flexion et à la compression. Elles se dissolvent dans l'eau et peuvent être extraits des parois des cellules végétales à l'aide de solutions alcalines [155].

2.28.3. La lignine

La lignine est communément considérée comme un polymère phénolique doté d'une structure amorphe et d'un degré de polymérisation compris entre 10 et 50. Par le biais de processus de décomposition chimique et/ou thermique, divers produits dérivés de la lignine peuvent être obtenus, qui servent de matières premières pour la fabrication de polymères synthétiques tels que les polyesters, les polyéthers et les dérivés de polystyrène [156]. Parmi les modifications chimiques décrites dans la littérature, on trouve l'acidolyse (ou hydrolyse), l'oxydation avec du nitrobenzène ou du permanganate, ainsi que l'hydrogénolyse [157].

2.29. Enjeux et intérêts des matériaux biosourcés

Le secteur de la construction consomme des ressources énergétiques en quantité importante. En effet, le secteur du bâtiment en est le plus grand consommateur (Tableau 2-1), il est donc important de réduire les impacts environnementaux du secteur de la construction, en particulier dans le domaine du bâtiment. Pour y parvenir, des règlements thermiques de plus en plus stricts ont été instaurés, définissant des critères que les bâtiments doivent respecter. Dans ce contexte, la notion d'éco-construction émerge, nécessitant une évolution des matériaux de construction pour répondre à ces exigences. Par conséquent, l'utilisation de matériaux à base de composants d'origine végétale, tels que les matériaux biosourcés, pourrait constituer une solution à explorer et à valider pour réduire l'empreinte environnementale de la construction.

Un article de Energy Magazine [158] met en évidence les défis spécifiques auxquels est confrontée l'Algérie en matière de consommation d'électricité, notamment en raison des conditions climatiques, de la répartition de la consommation et du modèle de consommation énergétique actuel. Il met en lumière les défis de la consommation d'électricité en Algérie, en mettant en avant le fait que la demande d'électricité est plus élevée en été qu'en hiver pour plusieurs raisons principales :

- Conditions climatiques : Les vagues de chaleur importantes en été entraînent une forte utilisation de la climatisation, un phénomène qui s'est considérablement accru au cours des dernières décennies. De plus, de nombreux systèmes de climatisation utilisés ne répondent pas aux normes modernes en termes d'efficacité énergétique, ce qui aggrave la consommation électrique.
- Répartition de la consommation : Les statistiques montrent que la majeure partie de la consommation d'électricité (66% au total) se situe dans des secteurs énergivores, principalement liés à la climatisation, tels que les logements, les collectivités locales et le secteur du commerce et des services.
- Modèle de consommation énergétique : Le modèle actuel repose sur une forte consommation de gaz naturel en hiver pour le chauffage et une forte consommation d'électricité en été pour la climatisation. Cette variation saisonnière crée des pics de demande d'électricité, en particulier pendant les vagues de chaleur estivales.

L'article souligne également qu'en août 2021, la société nationale d'électricité, Sonelgaz, a enregistré un pic de consommation d'électricité significatif en raison de la canicule, ce qui témoigne de l'augmentation continue de la demande énergétique. Il mentionne également le manque d'isolation dans de nombreux bâtiments ainsi que la prolifération des climatiseurs dans les foyers, avec parfois plusieurs unités par foyer, ce qui contribue à une consommation élevée d'électricité. Selon un expert cité dans l'article, les climatiseurs sont des appareils très énergivores.

2.30. Avantages des bétons à base de bois

- Avantages du bois comme matériau de construction [159, 160]

- Isolation thermique
- Régulation de l'humidité
- Coût peu élevé
- Économies d'énergie

- Avantages du bois comme enveloppe du bâtiment [161, 162]

- Les bétons à base de biomasse améliorent la résistance thermique du bâtiment
- Assurent le confort thermique intérieur
- Leur performance hygroscopique contribue également à améliorer le confort humidité intérieur

- Avantages des bétons à base de biomasse [163]

- Parmi les matériaux biosourcés à la croissance la plus rapide
- Composées d'un mélange de matériaux biosourcés (comme le chanvre, la paille et le lin), d'eau et de chaux
- Pèsent seulement 15% des bétons conventionnels
- Commencent à remplacer de nombreux anciens cadres en bois dans les structures
- Matériaux respectueux de l'environnement qui réduisent les émissions de gaz à effet de serre en évitant la combustion de carburant

2.31. Propriétés des bétons de bois

2.31.1. Propriétés mécaniques

Le Tableau 2-8[164] offre un aperçu des propriétés mécaniques de certains bétons végétaux, mettant en lumière des aspects essentiels de leur comportement. Cette analyse permet de déduire que, parmi ces propriétés, la résistance à la compression est la plus scrutée, tandis que d'autres caractéristiques telles que le module de Young et la résistance en flexion demeurent à explorer. En outre, il est observé que les performances mécaniques des bétons végétaux tendent à être inférieures à celles des bétons traditionnels. Cette tendance pourrait être attribuée au retrait du bois pendant le séchage, conduisant à des dommages au niveau de l'interface, comme souligné par Boustingorry [165].

Tableau 2-8 Quelques propriétés mécaniques des bétons végétaux : résistances en compression [164]

Matériau	Densité (Kg/m3)	Rc(MPa)	Rf(MPa)	E(MPa)
Béton de betterave	800	1,4-2,1	0,1-0,2	-
Ciment-argile-bois	850-1120	8,5-12,7	1,5-5	-
Ciment-argile-bois	620-1280	3-9,5	-	-
Ciment-argile-sapin	1000-1200	4-8	-	-
Béton de chanvre	250-660	0,25-1,15	-	4-160
Béton de bois	890-1400	8-32	-	2000-8500
Anas de lin agrolié	263-570	3,6-5,8	0,12-3,9	-

2.31.2. Propriétés hydriques

Les matériaux poreux tels les bétons végétaux, dont la porosité est ouverte, ont la propriété de fixer l'humidité de l'air environnant, ce qui qui favorise l'isolation thermique. Pour caractériser cette humidité, on utilise la teneur en eau comme paramètre. Par définition, c'est la quantité d'eau contenue dans le béton rapporté à la masse de celui-ci à l'état sec. Une augmentation (respectivement diminution) de l'humidité relative de l'air environnant un béton végétal conduit à une augmentation (respectivement diminution) de la teneur en eau de celui-ci. On parle alors d'adsorption (respectivement désorption). Sur ce sujet, les résultats de l'étude de Bouguerra et al.[166] sont illustrés dans la Figure 2-21. Cette courbe montre une hystérésis, indiquant que la relation entre la teneur en eau et l'humidité relative dépend du sens de l'évolution de cette dernière. De pareils résultats sont obtenus par Zaknoune [167].

Il est rapporté par Bederina et al [168], que pour des bétons de granulats de bois, la sensibilité à l'humidité est accompagnée par des variations dimensionnelles. D'après Nozahic [169], plus le matériau lignocellulosique contient une quantité importante d'hémicellulose, plus ce phénomène de retrait apparait. Pouvant ainsi conduire à la formation de vides entre la structure en bois et le béton servant de revêtement [170, 171].

L'eau agit comme un agent assouplissant pour les chaînes de polymères qui forment les parois cellulaires, ce qui entraîne une augmentation de leur mobilité. Il est donc essentiel de connaître voire de contrôler le taux d'humidité avant de mesurer les différentes propriétés du bois. Cependant, l'hygroscopicité rend difficile l'utilisation de particules lignocellulosiques comme granulats dans les mélanges de ciment [172] .

Il serait toutefois possible de réduire ce problème en augmentant la quantité du liant, bien que cela ne représente pas la solution la plus avantageuse en termes environnementaux.

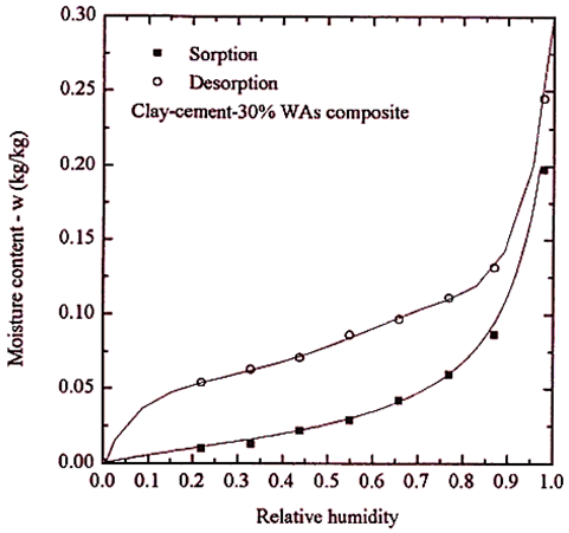


Figure 2-20 Courbe d'adsorption-désorption des composites argile-ciment-bois [166]

2.31.3. Propriétés thermiques

La caractéristique thermique des bétons végétaux la plus examinée dans la recherche concerne leur conductivité thermique, qui mesure la capacité du matériau à conduire la chaleur. Cette conductivité thermique se définit par le flux de chaleur traversant une surface d'un mètre carré avec une épaisseur d'un mètre du matériau, pour un écart de température d'un degré entre les surfaces d'entrée et de sortie. Cette caractéristique est influencée par divers facteurs fondamentaux tels que la densité, la température et le taux d'humidité.

Les études menées par Pham et al(Figure 2- 21)[173], montrent que la conductivité thermique d'un béton lignocellulosique diminue avec l'augmentation des particules végétales. Ceci est lié au fait que la conductivité thermique du liant est supérieure à celle des particules végétales. De plus, les études s'accordent à affirmer qu'il existe une relation linéaire entre l'humidité relative du milieu ambiant (caractère poreux du bois) et la conductivité [174].

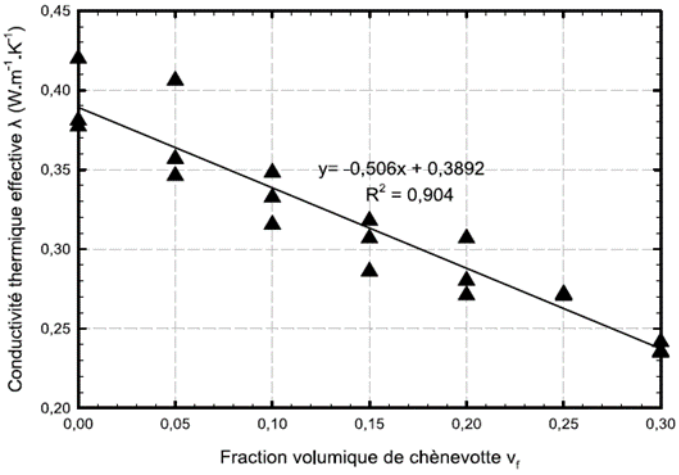


Figure 2-21 Conductivité thermique du béton de chanvre en fonction de la fraction volumique des particules de chanvre [173]

2.31.4. Durabilité des bétons végétaux

La durabilité d'un béton végétal, selon [175], se définit par sa capacité à résister à la fois aux dommages internes (compatibilité entre ciment et granulat ou fibre, changement de volume, etc.) et externes (variation de température et d'humidité, attaque de sulfate ou de chlorure, etc.). En d'autres termes, la durabilité d'un béton végétal indique sa capacité à maintenir ses propriétés fonctionnelles au fil du temps, dans des conditions normales d'utilisation. Cependant, la durabilité est un défi pour les bétons végétaux composés de matériaux généralement non compatibles.

Mohr et al. [176] ont étudié un composite de ciment renforcé par de la pâte kraft de bois de conifères, soumis à différents cycles de saturation en eau et de séchage. Les résultats ont montré une perte de résistance significative après un certain nombre de cycles, avec une dégradation particulièrement marquée lors des premiers cycles. Un mécanisme de dégradation en trois étapes a été proposé, comprenant la perte d'adhérence entre les fibres et le ciment, la formation d'hydrates dans les vides créés, et la fragilisation des fibres par minéralisation des parois de leurs cellules.

D'autre part, [177, 178] ont noté que des fibres naturelles plongées dans un ciment Portland se dégradent en raison de la dissolution de la lignine et de l'hémicellulose, et cette dégradation peut être expliquée par la cristallisation de chaux dans les pores des fibres. Des études ultérieures ont suggéré différentes méthodes pour améliorer la durabilité des composites, telles

que la carbonatation de la matrice cimentaire, l'immersion des fibres dans du « slurried silica fume » avant leur incorporation dans la matrice, ou le traitement de la matrice avec de la fumée de silice non densifiée. Une alternative prometteuse pourrait être de remplacer le ciment Portland par de l'argile calcinée afin de produire une matrice ne contenant pas d'hydroxyde de calcium, comme proposé par Toledo Filho et al. [179].

Dans une étude sur la durabilité des composites renforcés par des fibres de bambou, Lima et al. [180] ont montré que le traitement des fibres pouvait garantir leur durabilité, avec des variations de résistance en traction relativement faibles cycle après cycle, confirmant ainsi la durabilité de ces composites.

2.32. Les traitements possibles

De nombreuses publications ont vu le jour au cours des quarante dernières années sur l'utilisation de fractions lignocellulosiques dans la création de composites cimentaires. Ces rapports englobent un large éventail de déchets provenant de divers pays, comme mentionné dans [181, 182].

La succion d'eau des granulats lignocellulosiques est attribuée à leurs composants hydrophiles, ce qui peut entraîner une hydratation insuffisante du béton. De plus, la lixiviation de molécules spécifiques hydrosolubles peut entraîner un retard dans le processus de prise. Pour atténuer les échanges d'eau entre la matrice et les granulats, il est donc nécessaire de réaliser une isolation et de minimiser l'absorption d'eau par les granulats.

Afin de résoudre ce problème, trois approches principales sont disponibles :

L’extraction physique, thermique ou biologique des substances polysaccharidiques qui provoquent le retard de prise. Le procédé physique impliquant l'enduction ou l'imprégnation du bois pour limiter la libération de sucre et l'absorption d'eau destinée à l'hydratation du ciment a été étudié par [168] qui ont examiné les effets de ce traitement en appliquant trois types de pâtes distinctes sur des copeaux de bois : du ciment, de la chaux et un mélange des deux. De plus, l'imprégnation des copeaux de bois dans de l'huile a été évaluée. Les résultats ont indiqué que le traitement à l'huile présentait les meilleurs résultats en termes de rétrécissement lors du séchage, de légèreté et de conductivité thermique. Concernant la résistance mécanique, l'enduction de ciment s'est avérée la plus efficace en augmentant la rigidité des agrégats de bois.

L'objectif du traitement physique est de modifier la structure chimique du bois pour extraire ou dégrader l'hémicellulose. Des recherches antérieures ont indiqué que l'utilisation d'eau chaude à 80 °C pourrait permettre l'extraction de la cellulose, de la lignine et d'autres substances qui pourraient entraver la prise du ciment [183, 184] ont examiné la proportion d'extractions éliminées après le rinçage des copeaux dans de l'eau chaude. Ils ont conclu que trois à cinq rinçages étaient suffisants pour extraire une quantité significative de sucre.

La modification de la structure des agrégats par hydrophobisation chimique, obtenue en masquant les groupes hydrophiles. C'est la méthode la plus répandue. Les recherches expérimentales de [185] ont démontré qu'un prétraitement des copeaux de bois par immersion dans une solution de silicate de sodium améliorait la zone interfaciale de la pâte de ciment.

L’isolation des granulats en les enduisant d’une substance minérale ou organique difficilement perméable à l’eau. Les méthodes d'enrobage consistent à envelopper la surface des granulats lignocellulosiques afin de les séparer de la matrice cimentaire, tout en préservant leur structure poreuse qui contribue à leur capacité d'isolation. Un autre but est d'augmenter l'adhérence entre les particules végétales et la pâte de ciment, étant donné l'importance de cette relation pour les propriétés mécaniques des composites [186].

2.33. Conclusion

Ce chapitre bibliographique a mis en lumière l'importance et la diversité des bétons légers, en particulier ceux à base de copeaux de bois et de polystyrène expansé (EPS). Nous avons exploré leur histoire, leur définition, et leurs caractéristiques distinctives, en soulignant leur capacité à offrir des solutions efficaces pour l'isolation thermique et la réduction de la consommation énergétique dans le secteur de la construction. En Algérie, où l'efficacité énergétique est un enjeu crucial, ces bétons légers représentent une réponse innovante aux défis énergétiques actuels.

Le chapitre a également détaillé les différentes applications des bétons légers, qu'elles soient structurelles ou écologiques, illustrant leur polyvalence dans des domaines variés tels que les bâtiments de grande hauteur, les ponts et les structures marines. Les granulats légers, composants essentiels de ces bétons, ont été examinés en profondeur, de même que les méthodes de conception et de production.

En conclusion, les bétons légers à base de copeaux de bois et d'EPS se révèlent être des matériaux de construction innovants et performants, offrant des avantages significatifs en termes de réduction du poids des structures et d'amélioration des performances énergétiques. Leur utilisation croissante dans divers secteurs de la construction témoigne de leur potentiel à contribuer de manière significative à un avenir plus durable et économe en énergie. Ce chapitre fournit une base solide pour une compréhension approfondie et une application optimale des bétons légers dans le contexte actuel de transition énergétique.

3. CHAPITRE 3 : MATERIAUX ET ESSAIS

3.1. Introduction

L'un des aspects clés que nous aborderons dans ce chapitre est la manière dont les travaux expérimentaux ont été réalisés dans le cadre de cette étude. Par exemple, certains des matériaux utilisés dans cette recherche sont expliqués en fonction de leur pertinence et de leurs propriétés. Il convient de préciser que les billes de polystyrène employées peuvent être considérées comme des déchets valorisés lorsqu'elles proviennent de rebuts industriels ou de produits en fin de vie réutilisés sans transformation spécifique. Dans la section suivante, une description des techniques de caractérisation utilisées dans cette enquête est donnée. En conclusion de ce chapitre, un segment est consacré à montrer les essais réalisés au cours de notre investigation sur les composites obtenus à l'état frais et à l'état durci (sans et avec fibres/avec granulats naturels et déchets)

3.2. Matériaux utilisés

3.2.1. Ciment

Le ciment utilisé dans ce projet est un (CEM II), il contient 10% de poudre de calcaire, affiche une résistance à la compression de 42,5 MPa à 28 jours et une surface spécifique de 320 m^2/kg et de densité de 3.08 g/cm^3. La composition minéralogique déterminée par la diffractométrie de rayons X est représentée dans la Figure 3-1(a).

3.2.2. Sable

Le sable utilisé provient de OuedSouf, une province située dans le sud de l'Algérie. Il présente un module de finesse de 2,73, une masse volumique absolue de 2,36 g/cm^3 et une teneur en sable équivalente de 85%, ce qui confirme sa propreté. Selon l'analyse par diffraction des rayons X (Figure 3-1(b))[187], il s'agit d'un sable silico-calcaire.

3.2.3. Fillers

Les fillers sont conçus pour compléter la courbe granulométrique du sable dans sa fraction fine et pour remplir les vides inter granulaires. Un seul type de fillers a été utilisé dans le cadre de cette étude. Ces fillers sont fabriqués à partir de calcaire provenant d'une carrière située dans la région nord de Blida, en Algérie, en criblant des déchets concassés (maille de 80 mm). Ils ont une densité spécifique de 2,59 g/cm^3 et une surface spécifique de Blaine de 2800 g/cm^2. Il est à

noter que des fines sont nécessaires pour la production de béton de sable afin d'améliorer sa résistance et sa facilité de mise en œuvre.

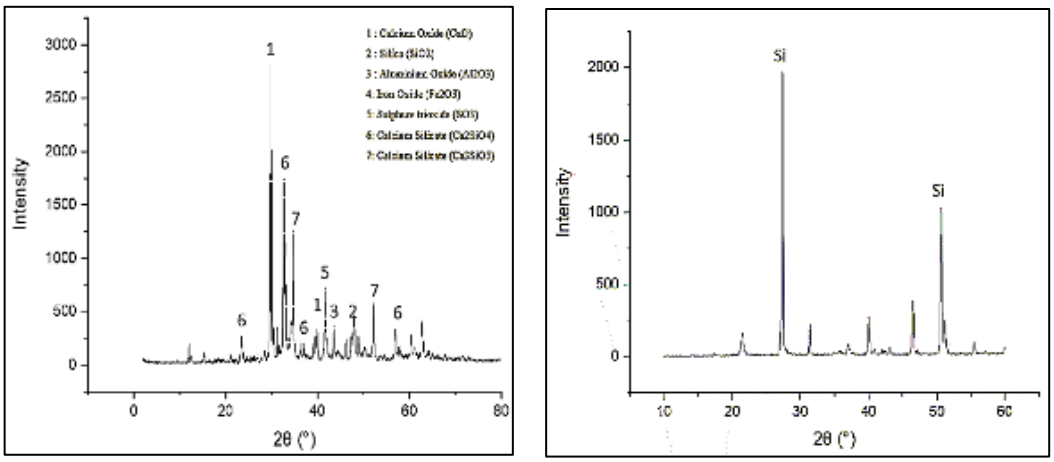


Figure 3-1 Analyse par diffraction des rayons X de (a) ciment (b) sable

3.2.4. Eau

L'eau utilisée dans cette étude est de l'eau potable avec une valeur de PH de 7.2. Pour maintenir une ouvrabilité similaire lors de l'utilisation de sable calcaire, un superplastifiant doit être utilisé.

3.2.5. Adjuvant

En tant qu'adjuvant, un superplastifiant / réducteur d'eau de haute performance de de la troisième génération. Il est conçu à base de Polycarboxylates d'Ether avec une densité de 1.07 kg/m^3 a été utilisé. La plage de dosage recommandée est de 0.5 à 2 % du poids de ciment.

3.3. Polystyrène granulé

Les billes de polystyrène expansé utilisées dans cette étude ont été produites par l'usine ENL, située dans la zone industrielle d'Oued Smar à Alger. Les caractéristiques de l'EPS utilisé sont récapitulées dans le Tableau 3-1.

Des études menées par Yamura et Yamauchi [115] ont démontré qu'après un mois d'immersion dans l'eau, les billes de polystyrène n'ont pas absorbé d'eau. De plus, ces billes sont hydrophobes et présentent des charges électrostatiques en surface.

L'emploi de ce déchet pour alléger le béton diminue sa densité et améliore son isolation thermique, étant donné qu'il est constitué de 2 % de polystyrène et de 98 % d'air [74] . La Figure

3-2 illustre que la bille présente une forme sphérique avec une surface lisse. Les images obtenues par MEB présentées dans cette figure révèlent une structure alvéolaire et poreuse, ce qui suggère une propriété hydrophobe. Ainsi, les billes de polystyrène expansé (EPS) sont imperméables, même sous des pressions d'eau élevées.

Tableau 3-1 Caractéristiques du EPS utilisé

Granulométrie	1- 4 mm
Masse volumique absolue	28 kg/m^3
Masse volumique apparente	18 kg/m^3
Absorption	0 %
Conductivité thermique	0.0045 W/m.K

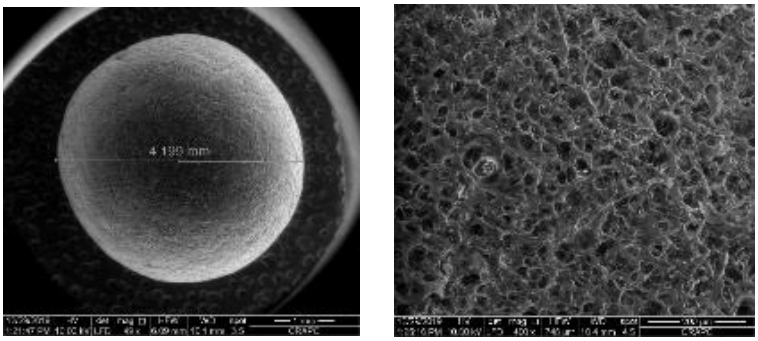


Figure 3-2 Images MEB de la structure d'une bille de polystyrène

3.4. Copeaux de bois

Pour alléger le béton, des copeaux de bois de type bois rouge, issus de résidus de menuiserie, ont été utilisés. Ces copeaux se caractérisent par leur aspect fibreux, leur forme non uniforme illustrée dans la figure 3-3, une densité d'environ 160 kg/m³, ainsi qu'un taux d'absorption d'eau avoisinant 150 %.

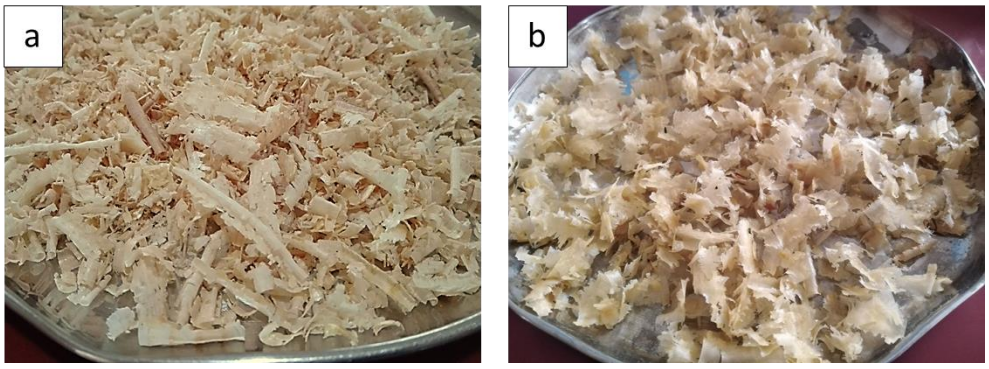


Figure 3-3 copeaux de bois a) non traités b) traités

3.5. Traitement des granulats légers

3.5.1. Importance du Traitement des EPS

Les billes de polystyrène granulé doivent être traitées avant d'être incorporées dans le béton pour plusieurs raisons essentielles. Tout d'abord, le polystyrène est naturellement hydrophobe et possède une surface lisse, ce qui peut compromettre son adhérence au ciment. Ainsi, un traitement de surface est nécessaire pour améliorer cette adhérence et garantir la cohésion du béton. De plus, sans traitement adéquat, les espaces entre les billes pourraient piéger l'eau, réduisant ainsi les propriétés d'isolation thermique du béton et affectant sa durabilité. Le traitement contribue également à assurer la stabilité dimensionnelle des billes de polystyrène face aux variations de température, évitant ainsi toute dilatation ou contraction excessive. Enfin, un traitement approprié aide à prévenir la ségrégation des billes dans le mélange de béton, assurant une distribution uniforme et préservant ainsi la structure et les propriétés du matériau fini. En résumé, le traitement des billes de polystyrène est essentiel pour garantir leur intégration efficace dans le béton sans compromettre ses performances physiques et mécaniques.

3.5.2. Technique de traitement

Plusieurs chercheurs ont tenté de traiter les billes de polystyrène expansé (EPS) de différentes manières, allant de modifications chimiques à des modifications thermiques. On peut citer la méthode de recyclage chimique des déchets de polystyrène développée par Amianti et Botaro [188], qui consiste à dissoudre l'EPS dans un mélange d'acétone et de cyclohexane. Ou encore le traitement thermique conçu par Kan et Demirboğa [133], où des échantillons de mousse EPS sont exposés à certaines températures afin de changer leur densité. Cependant, certaines méthodes sont coûteuses ou peuvent être difficiles à réaliser dans le cas des billes de polystyrène. Nous avons développé une nouvelle technique pour le traitement de l’EPS. Une peinture acrylique en pot de 5 kg, au coût de 600 DA, a été utilisée pour traiter 1 kg d'EPS. Cette technique consiste à immerger les billes dans un réservoir rempli de peinture acrylique, puis à les étaler pour les faire sécher. Après l'application, les billes traitées ont été laissées à sécher à température ambiante pendant 48 heures, garantissant l'évaporation complète de l'eau contenue dans la peinture et la formation d'une couche protectrice solide autour de chaque bille. Enfin, les billes sont dispersées en les frottant entre les mains avec précaution afin de ne pas

endommager la couche de peinture. La Figure 3-4 montre la description de ce processus de traitement.



Figure 3-4 technique de traitement des billes de polystyrène granulé

La Figure 3-5 montre les billes de EPS avant et après traitement. Après ce processus, la masse volumique c'est multiplié par 7, devenant ainsi 190 kg/m^3

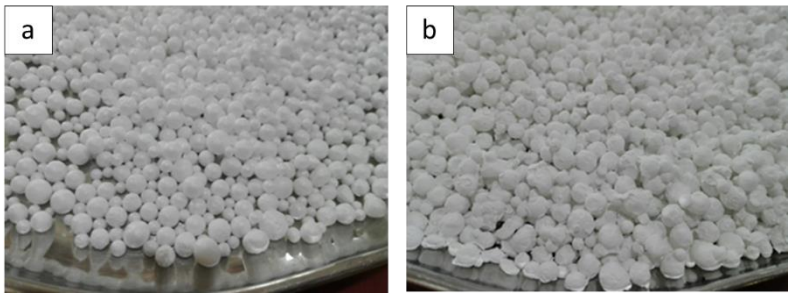


Figure 3-5 Billes de EPS a) non traitées b) traitées

3.6. Traitement des copeaux de bois

Le traitement préalable des copeaux de bois est une étape essentielle pour garantir la qualité et la durabilité des bétons composites incorporant ce type de matériau organique. En effet, Le traitement des copeaux de bois avant leur incorporation dans le béton est essentiel pour assurer la compatibilité chimique, améliorer l'adhérence au ciment, garantir la stabilité dimensionnelle, augmenter la durabilité face à la biodégradation, limiter l'absorption d'eau et potentiellement améliorer les propriétés d'isolation du béton composite. Ces étapes de préparation permettent de réduire les risques de réaction chimique indésirable, de fissuration due aux variations dimensionnelles du bois, et d'atteinte à la structure du béton par l'humidité ou les organismes décomposeurs, assurant ainsi la qualité et la longévité du matériau.

3.6.1. Technique de traitement

Il est bien connu que les bio-matériaux sont généralement composés de cellulose, d'hémicellulose et de lignine [189] . Le sucre qu'ils contiennent peut abaisser le pH de la matrice de ciment et inhiber l'hydratation du ciment, affectant ainsi les propriétés mécaniques du béton léger. Pour éviter ce phénomène, le traitement utilisé a consisté à faire bouillir les copeaux dans de l'eau pendant quatre heures. %. Le résultat est illustré dans la figure3-3. Selon Da Gloria et Toledo Filho [184], cela suffit pour changer la composition chimique du bois et ainsi éliminer la matière organique. Pour maintenir un rapport E/C constant dans tous les mélanges, celui-ci a été calculé en tenant compte de la quantité d'eau absorbée par les copeaux de bois traités après un séchage de 24 h à l'étuve à 105 °C, puis en la soustrayant de la quantité initiale d'eau absorbée (à l'état saturé).

Le coût du traitement des copeaux de bois par ébullition et séchage dépend principalement de l'énergie consommée. Faire bouillir les copeaux pendant 4 heures nécessite environ 40 DA d'électricité, tandis que le séchage à 80°C pendant 24h consomme environ 180 DA. En ajoutant les coûts liés à l'eau, à la manutention et à l'équipement, le coût total du traitement est estimé entre 270 et 320 DA par cycle, selon la quantité de copeaux traitée et la source d'énergie utilisée.

Les analyses de diffraction des rayons X, tant pour les copeaux de bois non traités que pour ceux traités, sont exposées dans la Figure 3-6. Ces analyses ont mis en évidence le rôle prépondérant de la cellulose dans la composition des copeaux de bois examinés. Il s'avère que ces copeaux de bois constituent des matériaux lignocellulosiques de par leur forme, comme souligné dans les travaux de Marcovich et al. [190]. L'étude a également révélé que le processus de modification augmente l'intensité de la diffraction des copeaux, ce qui indique que le traitement thermique améliore à la fois l'indice de cristallinité et l'organisation des cristallites. Cette augmentation de la cristallinité de la cellulose, observée dans les échantillons traités comparativement aux copeaux bruts, est attribuée à la diminution des hémicelluloses durant le traitement, conformément aux observations de Benyoucef et Harrache [191] ainsi que Alemdar et Sain [192].

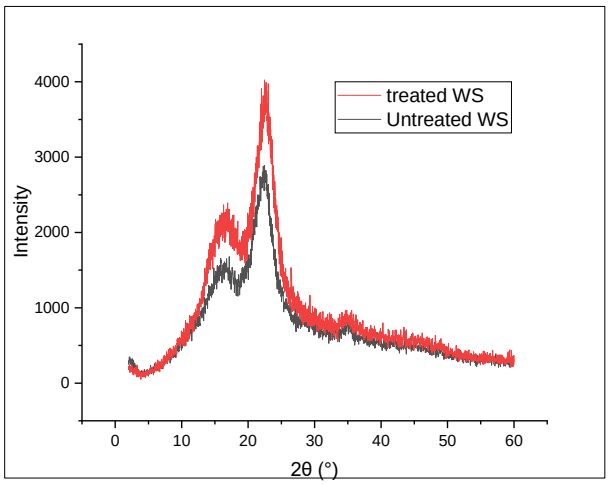


Figure 3-6 Analyse par diffraction des rayons X des copeaux de bois

3.7. Formulation des échantillons

La préparation des échantillons destinés à l'expérimentation se déroule en plusieurs étapes clés, débutant par la formulation d'un béton témoin qui sert de base de référence. La phase suivante, centrée sur la formulation des bétons allégés, se subdivise en trois approches distinctes : l'allègement par l'utilisation de polystyrène expansé (EPS), l'allègement par l'incorporation de copeaux de bois (WS) et enfin, une méthode combinée qui intègre à la fois l'EPS et les WS. Cette structure méthodologique permet une évaluation approfondie et comparative des impacts spécifiques de chaque technique d'allègement sur les propriétés du béton, offrant ainsi une compréhension nuancée des avantages et des limitations associées à chaque approche.

3.7.1. Formulation d'un béton de référence

Cette étape consiste à déterminer la meilleure composition de béton de sable en utilisant la méthode expérimentale SABLOCRETE [3] Comme détaillé dans la section 1.9.2. La composition pour 1 m^3 figure dans le Tableau3-3.

Tableau 3-3 Composition du béton témoin

Ciment (Kg/m^3)	Sable (Kg/m^3)	Eau (l)	Calcaire (Kg/m^3)	Adjuvant (Kg/m^3)
350	1470	220	110	2.1

3.7.2. Formulation des bétons allégés

Ensuite, outre le béton témoin, cinq pourcentages différents de déchets ont été pris en compte pour chaque type de béton (EPS, WS et EPS+WS) à savoir :10, 20, 30, 40, et 50 %, comme il est présenté dans le Tableau 3-4. Le taux de granulats légers a été déterminé sur la base du volume, en les substituant au sable naturel selon les équations fournies ci-après.

$$\rho sable = Msable/Vsable\ (1),\ \rho_{LWA} = M_{LWA}/V_{LWA}\ (2) \rightarrow V_{LWA} = M_{LWA}/\rho_{LWA}\ (2')$$

$$V_{LWA} = ratio\% * V\ s\ (3) \rightarrow M_{LWA} = V_{LWA} * \rho_{LWA}\ (4)$$

ρ: densité; M: masse; V: volume ; LWA : granulat léger

Pour maintenir le rapport E/C constant dans tous les mélanges, il a été calculé après avoir pris en compte la quantité d'eau absorbée par les copeaux de bois traités après les avoir séchés pendant 24 h à 80 °C, puis en la soustrayant de la quantité initiale d'eau.

La quantité d'adjuvant est ajustée en fonction du type et du taux des granulats utilisés pour assurer une bonne ouvrabilité du béton. Dans les bétons à base d'EPS, l'augmentation du taux d'EPS réduit l'ouvrabilité, nécessitant une plus grande quantité d'adjuvant pour améliorer la fluidité du mélange. Cela s'explique par la nature hydrophobe et légère de l'EPS, qui limite la dispersion de l'eau et du liant. En revanche, pour les bétons contenant des copeaux de bois traités et saturés (WS), l'augmentation de leur proportion rend le mélange plus fluide, réduisant ainsi le besoin en adjuvant. Dans les bétons combinant EPS et WS traités, la demande en adjuvant diminue par rapport aux bétons contenant uniquement de l'EPS, mais reste supérieure à celle des bétons à base de WS seuls, afin de compenser l'effet de l'EPS sur l'ouvrabilité du mélange.

Tableau 3-4 composition des différents bétons légers

Béton de WS							
	Sable (kg/m^3)	Ciment (kg/m^3)	Calcaire (kg/m^3)	WS (kg/m^3)	EPS (kg/m^3)	Eau (kg/m^3)	Adjuvant (kg/m^3)
SCWS10	1323	350	110	09.33	0	213.3	2.06
SCWS20	1171			18.67		206.60	1.95
SCWS30	1029			28.00		200.00	1.90
SCWS40	882			37.33		193.20	1.84
SCWS50	735			46.67		186.50	1.78
Béton de EPS							
SCEPS10	1323	350	110	0	11.08	220	1.93
SCEPS20	1176				22.16		1.95
SCEPS30	1029				33.24		1.99
SCEPS40	882				44.33		2.12
SCEPS50	735				55.41		2.20
Béton de EPS+WS							
EPS+WS10	1323	350	110	4.64	5.54	216.6	2.06
EPS+WS20	1176			9.33	11.08	213.23	2.03
EPS+WS30	1029			14.00	16.62	209.84	2.00
EPS+WS40	882			18.67	22.16	206.45	1.97
EPS+WS50	735			23.33	27.71	203.07	1.94

3.8. Fabrication des échantillons

3.8.1. Protocole de malaxage

La formulation du mélange pour le béton léger diffère essentiellement de celle du béton normal en raison de l'impact prédominant des granulats légers utilisés [92]. D'après la littérature, le dosage des granulats légers doit être effectué de manière volumétrique autant que possible. Étant donné que la plupart des centrales à béton ne disposent que d'un système de pesée gravimétrique, il est nécessaire de vérifier régulièrement la teneur en humidité et l'absorption des granulats légers [101], ainsi que leur densité en vrac, et d'ajuster le dosage en conséquence.

Tous les autres composants sont mesurés de manière standard. Pendant le processus de mélange, les granulats légers sont ajoutés en premier.

Environ deux tiers de l'eau de gâchage requise, ainsi que l'eau nécessaire pour compenser l'absorption, sont ajoutés au mélangeur en marche et mélangés pendant environ 30 secondes. Cela est particulièrement important lorsque du sable léger est utilisé, car il absorbe une quantité relativement importante d'eau. Si les granulats légers sont pré-humidifiés, il est important qu'ils soient uniformément humidifiés [102]. Ensuite, le ciment est ajouté au malaxeur, suivi du reste de l'eau de gâchage. Les additifs en poudre sont incorporés avec le ciment. Si la fumée de silice est utilisée, elle doit être ajoutée soit sous forme de poudre avec d'autres additifs secs, soit sous forme de suspension avec le reste de l'eau de gâchage. Les adjuvants doivent être ajoutés aussi tard que possible, de préférence avec le reste de l'eau de gâchage, afin d'éviter une absorption incontrôlable par les granulats légers. Le temps de mélange minimal du béton léger structural, après l'ajout de tous les composants, doit être prolongé de 30 à 60 secondes à 90 secondes, par rapport au béton normal [99].

Tableau 3-5 Protocole de malaxage adopté

Etape	Matériaux introduits	Durée et vitesse de malaxage
1	LWA+2/3 eau+ sable	2 min lente
2	Ciment +calcaire	2min rapide
3	1/3 eau+ adjuvant	1min lente
4	Raclage	15s
5	Mélanger	30s rapide

3.8.2. Mise en œuvre et conservation des éprouvettes

Pour examiner les propriétés du béton à base de granulats de bois, nous avons fabriqué deux variétés d'échantillons. La première série d'échantillons comprend des prismes d'environ 4×4×16 cm^3, utilisés pour analyser les propriétés physiques, mécaniques et hydromécaniques. La seconde série, destinée aux tests des propriétés thermiques, consiste échantillons de 4×10×10 cm^3. La méthode de fabrication de ces échantillons implique le coulage du béton dans les moules par incréments, suivi d'un positionnement manuel sans compaction, répétant ces étapes jusqu'à ce que le moule soit plein. Cette technique a assuré une bonne disposition du

béton dans tous les moules pour chaque formulation testée. Le démoulage s'est effectué 24 heures après le coulage, et les échantillons ont ensuite été stockés dans des conditions à un environnement contrôlé (humidité relative ≈ 60 %, température = 20 °C). Cette procédure a été spécifiquement choisie pour les tests thermiques afin de séparer les effets de l'hydratation du ciment de ceux du séchage du matériau.

3.9. Essais réalisés à l'état frais

3.9.1. Maniabilité

Elle permet l'évaluation de la maniabilité d'un béton de sable, objet des tests définis par la norme AFNOR NFP 18-452 [193]. Cette propriété est mesurée par le délai d'écoulement du béton sous vibration. L'instrument employé pour cette mesure est le Maniabilimètre à mortier LCL (B) (figure 3-3). Suite à ces mesures, la maniabilité de toutes les compositions de béton a été ajustée afin de garantir une uniformité de cette caractéristique pour tous les mélanges.



Figure 3-7 Maniabilimètre LCL à mortier

3.9.2. Densité

La densité du béton de sable a été mesurée selon la norme NF EN 12350-6 [194]. L'essai consiste à remplir un moule de volume connu avec le béton frais en plusieurs couches, tout en le compactant pour éliminer l'air emprisonné. Après nivellement, la masse du béton est mesurée, puis la densité est calculée en divisant cette masse par le volume du moule

3.10. Essais réalisés à l'état durcis

3.10.1. Masse volumique apparente

Cet essai est réalisé selon la norme NF EN 12390-7 [195]. Les éprouvettes ont été mises à l'étuve à 105 ± 5 °C jusqu'à masse constante afin d'éliminer toute l'humidité résiduelle. Ensuite, elles sont pesées avec une balance précise à 0,01 g près (figure 3-3) et leurs dimensions sont mesurées à l'aide d'un pied à coulisse avec une précision de 0,01 mm. La masse volumique sèche apparente pour chaque composition est obtenue en calculant la moyenne de trois mesures.

$$\gamma = \frac{M}{V}$$

avec : γ la masse volumique exprimé en Kg/m3, M la masse des éprouvettes en Kg et V le volume des éprouvettes en m3

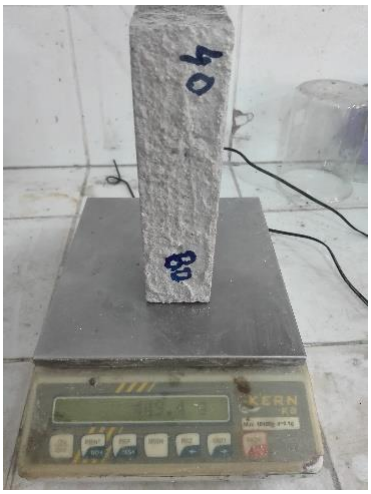


Figure 3-8 Mesure de la masse

3.10.2. Résistance à la traction

Conformément à la norme NF EN 12390-5[196], cet essai est largement adopté. Il implique la flexion (par trois points) d'une éprouvette prismatique de côté a et de longueur L. Pour notre étude, nous réalisons cet essai sur des éprouvettes prismatiques de dimensions 4×4×16 cm, à des intervalles de 7, 14 et 28 jours Figure3-9.



Figure 3-9 Dispositif de l'essai de traction par flexion

3.10.3. Résistance à la compression

La résistance à la compression est définie selon la norme NF EN 12390-3[197], comme le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette, ce qui correspond à la contrainte moyenne d'écrasement sur trois éprouvettes à chaque âge d'essai. La contrainte de rupture est calculée de la manière suivante :

$$R_C = Fc/b^2$$



Figure 3-10 Dispositif de l'essai de compression

3.10.4. La porosité accessible à l'eau

À la fin de la période de cure, les demi-prismes des éprouvettes de dimensions 4x4x16cm sont placés dans une étuve ventilée à 40 ± 5 °C jusqu'à ce qu'ils atteignent un poids constant. Ensuite, ils sont immergés dans l'eau jusqu'à ce qu'ils atteignent à nouveau un poids constant (Figure 3-11). L'échantillon est ensuite soumis à une imbibition sous vide, et une fois saturé, il est pesé à la fois dans l'eau (Meau) et dans l'air (Mair). Ensuite, l'échantillon est séché dans une étuve ventilée à 105 ± 5 °C jusqu'à ce qu'il atteigne à nouveau un poids constant, et une mesure de masse (Msec) est réalisée. La porosité accessible à l'eau a été mesurée à l'aide de dessiccateurs en verre munis d'un disque perforé relié à une pompe à vide et à un manomètre à pression négative conformément à la norme RILEM CPC 11.3[198].

La porosité volumique accessible à l'eau (ε), exprimée en pourcentage, est calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$\varepsilon = \frac{Mair - Msec}{Mair - Meau} X\ 100$$

ε (%): La porosité totale

M_{air}: La masse d'éprouvette imbibée pesé dans l'air

M_{sec}: La masse d'éprouvette sèche

M_{eau}: La masse d'éprouvette immergée dans l'eau



Figure 3-11 Dispositifs utilisés pour l'essai d'accessibilité à l'eau

.

3.10.5. Microstructure

La microstructure des composites étudiés a été examinée à l'aide d'un microscope électronique à balayage (MEB) Thermofisher-tungstène, capable d'analyser des échantillons non conducteurs comme le bois et le polystyrène. Initialement, l'échantillon à analyser est collé sur un porte-échantillon métallique circulaire adaptable au porte-objet du microscope. Pour effectuer la numérisation, le dispositif contenant l'échantillon est placé dans la chambre intérieure du microscope et déplacé à l'aide de verniers. Comme le microscope présente une caractéristique de pression contrôlée, l'échantillon n'est pas métallisé avant qu'un détecteur d'électrons rétrodiffusés ne produise des électrons primaires à partir d'un filament de tungstène chauffé à 2700 K [191].

Cette analyse a été réalisée sur des échantillons prélevés à partir de coupes d'éprouvettes de dimensions 4x4x16 cm ainsi que les granulats légers utilisés dans ce travail (WS et EPS).

Les micrographies obtenues permettent d'observer la microstructure de la surface des échantillons, puis de déterminer l'effet de l'introduction des LWA.

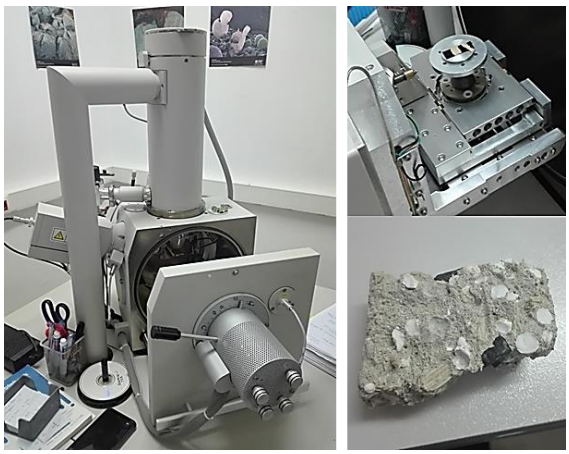


Figure 3-12 Microscope Electronique A Balayage (MEB) et échantillons

3.10.6. La résistance au feu

Pour tester la résistance au feu du béton, des spécimens âgés de 28 jours ont été transportés vers un four électrique et chauffés à un taux constant de 10 °C/min pour quatre cycles de température différents allant de 80 °C à 100, 200 et 400 °C. Une fois que le four électrique a atteint la température cible, elle a été maintenue constante pendant deux heures pour assurer une distribution uniforme à travers les spécimens de béton conformément à la norme ISO 834[199].

À la fin de chaque cycle de température de chauffage, les échantillons ont été refroidis à température ambiante dans le four scellé pendant 24 heures avant d'être examinés visuellement avec un appareil photo numérique pour évaluer la présence de porosité et de fissures, puis des tests physiques et mécaniques ont été effectués. À chaque température, des mesures de perte de masse ont été réalisées.

Des mesures de masse ont été réalisées sur les éprouvettes, des tests de compression pour déterminer leur résistance à la compression. En outre, à la conclusion de chaque cycle thermique, des observations visuelles ont été effectuées pour identifier les dommages induits par les hautes températures.

Le degré de déshydratation (exprimé en pourcentage de perte de masse) est évalué en utilisant la relation suivante :

$$Perte\ de\ masse\ (\%)\ =\ [(M1 - M2)/M1)]\ x\ 100$$

M1, M2 : les masses des éprouvettes avant et après le chauffage respectivement



Figure 3-13 Le four à moufle

3.10.7. Conductivité thermique

La nature des constituants ainsi que la morphologie du milieu (réseau poreux et matrice solide) sont des paramètres qui ont une directe influence sur le transfert thermique. De nombreuses méthodes sont employées pour mesurer cette conductivité. Elles consistent à exposer l'échantillon à un flux thermique, puis à mesurer soit un profil de température, soit un flux de chaleur. Parmi ces méthodes, on trouve la méthode de la plaque chaude gardée, la méthode du

fil chaud, la méthode flash, la méthode Hot-Disk et la méthode calorimétrique. Dans notre étude, la conductivité thermique des divers bétons a été évaluée à l'aide d'un CT Mètre, conforme à la norme NF EN 12667 [200], sur des échantillons de dimensions 4 × 10 × 10 cm.



Figure 3-14 Dispositif pour l'essai de la conductivité thermique

3.11. Conclusion

Ce chapitre a offert un aperçu détaillé des caractéristiques intrinsèques des matériaux utilisés dans la préparation des échantillons soumis à nos analyses expérimentales. L'examen approfondi de ces matériaux est essentiel, car il influence directement l'interprétation des comportements observés lors des tests. Nous avons également présenté les différentes campagnes de mesures expérimentales mises en œuvre, qui ont été cruciales pour l'évaluation précise de l'effet des granulats légers sur les propriétés physico-mécaniques et thermiques du béton de sable.

Dans ce chapitre, nous avons privilégié l'utilisation de matériaux locaux accessibles sur le marché algérien, tels que le ciment, les granulats, les superplastifiants, et les billes de polystyrène expansé, pour la fabrication de bétons légers. Cette sélection vise à mettre en évidence les potentialités et les performances de ressources facilement disponibles, tout en explorant leur applicabilité dans des solutions de construction innovantes et adaptées aux contextes locaux.

En conclusion, les méthodes et matériaux choisis pour cette étude sont justifiés non seulement par leur pertinence scientifique mais aussi par leur adaptabilité aux conditions et aux équipements de notre laboratoire. Cette synergie entre choix méthodologique et ressources disponibles a été déterminante pour le succès de nos expérimentations et pour la fiabilité de nos conclusions.

4. CHAPITRE 4 : RESULTATS ET DISCUSSION

4.1. Introduction

Ce chapitre est dédié à la présentation et à l'analyse des résultats obtenus au cours de cette recherche, dont l'objectif principal est de contribuer à la valorisation des billes de polystyrène expansé (PSE) et des copeaux de bois (WS), dans la perspective de développer un éco-matériau léger. Cette étude s'inscrit dans une démarche d'innovation écologique et technique, cherchant à remplacer une fraction optimale de granulats naturels par des billes de PSE traitées et des WS traités, afin d'évaluer l'impact de ces substitutions sur les propriétés physico-mécaniques et thermiques des bétons de sable.

L'analyse des résultats s'articule autour de trois axes principaux : le premier et le second, examinent l'effet du remplacement progressif du sable par des billes de EPS, puis le remplacement par es WS, sur les caractéristiques mécaniques et thermiques du matériau final. Le troisième axe explore plus spécifiquement les synergies et les interactions entre ces deux types de granulats légers, envisageant leur incorporation simultanée (EPS+WS) et leurs effets combinés sur les propriétés du béton.

Ce chapitre vise à établir une compréhension claire des contributions potentielles de ces matériaux alternatifs dans le domaine de la construction durable, tout en soulignant les défis techniques et les opportunités qu'ils présentent. Les résultats obtenus sont discutés en détails, fournissant une base solide pour de futures recherches et applications pratiques dans l'élaboration de bétons écologiques plus légers et performants.

4.2. Effet de l’incorporations des WS sur le béton de sable

4.1.1. Maniabilité

Pour évaluer la rhéologie à l’état frais des bétons élaborés, nous avons effectué des essais de maniabilité, dont le résultat est quantifié par la mesure du temps d’écoulement. Bien que ce test ne fournisse pas directement des paramètres rhéologiques détaillés comme le seuil d’écoulement ou la viscosité plastique (qui nécessitent un rhéomètre), il donne une indication sur la fluidité et la consistance du mélange, qui sont des aspects fondamentaux de la rhéologie des bétons et mortiers. Par ailleurs, afin de mieux contrôler l'utilisation de l'eau de gâchage, qui joue un rôle essentiel dans les propriétés physico-mécaniques du béton, un rapport eau/ciment constant a été maintenu.

Il convient de noter que la maniabilité est la même pour toutes les compositions. Cette dernière a été étudiée à l'aide de l'essai de maniabilité (Figure 4-1). Un temps d’écoulement compris entre 7 et 10s selon les recommandations de Sablocrete[3] a été assurée pour toutes les compositions testées.

Dans diverses études, il a été démontré que l'ouvrabilité des composites est entravée en raison de la diminution des temps de prise initial et final des matériaux cimentaires.

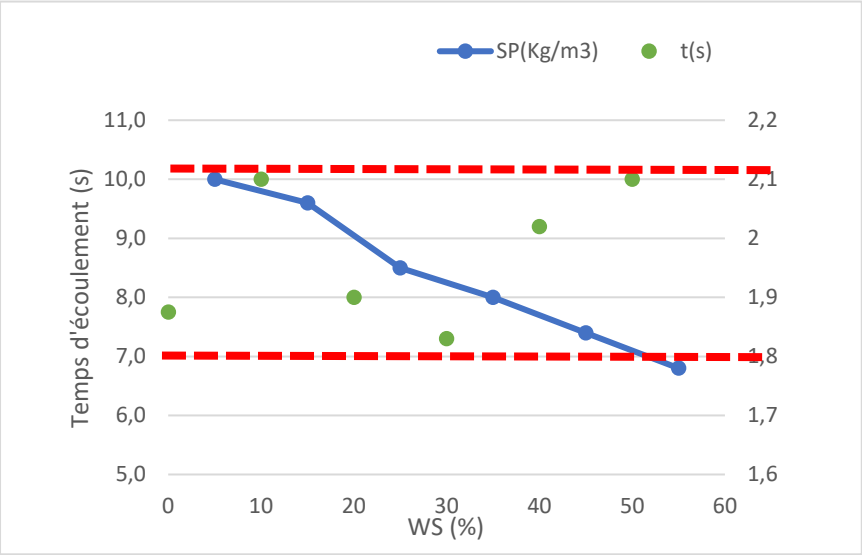


Figure 4-1 Maniabilité pour les bétons de WS

4.2.1. Densité

Les valeurs de densité pour toutes les formulations sont illustrées dans la Figure 4-2 [187]. L'incorporation de copeaux de bois (WS) entraîne une réduction de la densité du béton frais. L'analyse des résultats montre que cette diminution est moins prononcée lorsque la proportion de WS est faible, variant de 6 % pour un béton contenant 10 % de SCWS à 19 % pour un béton avec 50 % de SCWS. Ce diminution a également été observé par Morales-Conde et al.[201]. De plus, après 28 jours de cure, la densité des bétons de LWA étudiés était inférieure à 2000 kg/m³, les classant ainsi dans la catégorie des bétons légers, conformément à la norme NF EN 206-1 (AFNOR) [67], qui définit comme légers les composites ayant une densité comprise entre 800 kg/m³ et 2000 kg/m³. Tous les échantillons testés répondent donc à cette classification. Comme le montre la Figure 4-2, les échantillons SCWS10, 20 et 30 % appartiennent à la classe (D2.0), tandis que ceux contenant 40 et 50 % de WS se classent dans la catégorie (D1.8).

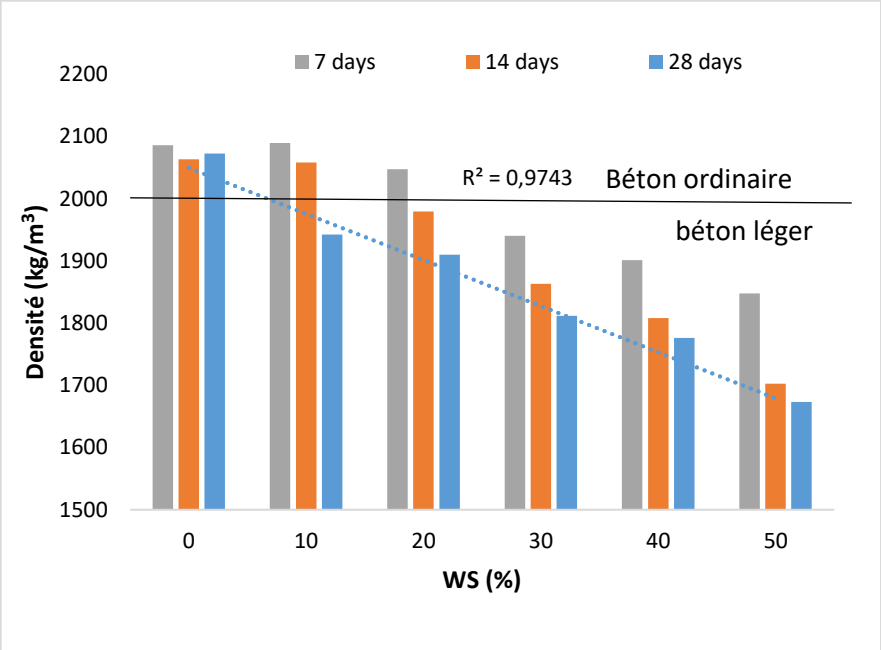


Figure 4-2 Densité du béton de WS à différents âges

Le béton de sable, en raison de sa granularité plus fine, est donc plus léger que le béton conventionnel, le remplacement du sable par des WS, encore plus légers, a contribué à une réduction supplémentaire de la densité [202, 203] . Cette légèreté peut être attribuée à la faible densité des WS. En outre, l'évolution de ce paramètre en fonction du ratio de WS aux jours 7, 14 et 28, indique une diminution significative de la densité en fonction de l'âge de cure. Ces résultats sont en accord avec d'autres études qui ont identifié deux facteurs principaux responsables de ces observations : l'évaporation de l'eau absorbée par les copeaux de bois durant le séchage, conduisant à une porosité accrue dans la matrice, ainsi que la structure poreuse du bois lui-même[204].

4.2.2. Résistance mécanique

- **Résistance à la compression**

La Figure 4-3 présente la relation entre la densité du béton et sa résistance à la compression. Il apparaît que la résistance à la compression du béton est proportionnelle à sa densité. On remarque, une réduction notable de la résistance est observée lorsqu'on passe du béton témoin au béton le plus léger. La perte de résistance varie de 12 % pour le SCWS10 à 35 % pour le SCWS50. Plus la quantité de bois dans le béton est importante, moins celui-ci est résistant. Morales-Conde et al.[201] sont parvenus à une conclusion similaire. Cette diminution de la résistance peut être attribuée à la haute porosité induite par les copeaux de bois, comme le montre la Figure 4-4. En effet, l'ajout de copeaux de bois en remplacement du sable a significativement augmenté la porosité des échantillons [205]. De plus, le

remplacement du sable par des copeaux de bois a considérablement augmenté la surface spécifique des granulats. Donc, la quantité de ciment initialement prévue devient insuffisante pour enrober efficacement cette surface accrue, ce qui peut affecter la cohésion et la résistance du béton [206]. Guo et al. [205] ont également noté que la baisse de résistance pourrait être due à la faible adhérence entre les copeaux de bois et la matrice de SC. Les valeurs de résistance à la compression des mélanges rapportées dans la littérature varient considérablement, influencées par de nombreux facteurs tels que le type de ciment utilisé, le type de bois, le traitement des particules de bois, le ratio eau/ciment, et le processus de mélange. Tamba et al. [207] ont mesuré une résistance de 6,7 MPa avec différentes espèces de bois mais avec le même ratio, tandis que Sotannde et al. [208] ont enregistré 8,5 MPa. Malgré les variations dans les résultats de résistance à la compression, les auteurs s'accordent sur le fait que la résistance du béton contenant des copeaux de bois diminue à mesure que le volume des particules de bois augmente.

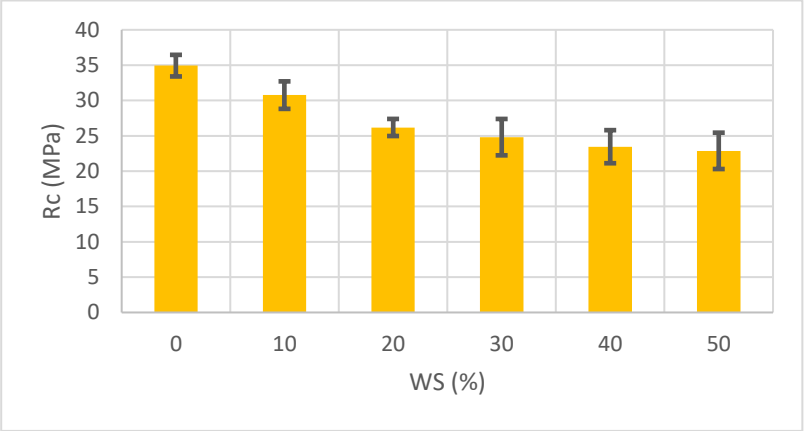


Figure 4-3 Résistance à la compression des bétons de WS

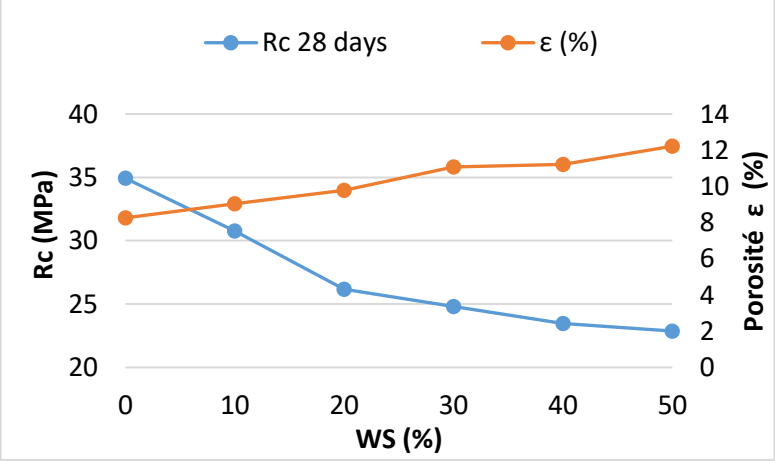


Figure 4-4 Variation de la résistance à la compression à 28 jours et de la porosité (ε) du béton en fonction des copeaux de bois (WS)

- **Résistance à la flexion**

L'étude a évalué la résistance à la flexion à 28 jours, comme illustré dans la Figure 4-5. L'analyse comparative des effets de l'incorporation de résidus de bois dans le béton de sable, tant pour la résistance à la flexion que pour la résistance à la compression, a révélé des impacts similaires sur les deux paramètres de résistance. Il en résulte une diminution des valeurs de résistance des compositions de 19 % et 45 % en comparaison avec le béton de référence. Ces observations sont en accord avec celles rapportées par Siddique et al. [206], qui ont également enregistré des réductions comparables pour les deux types de résistance.

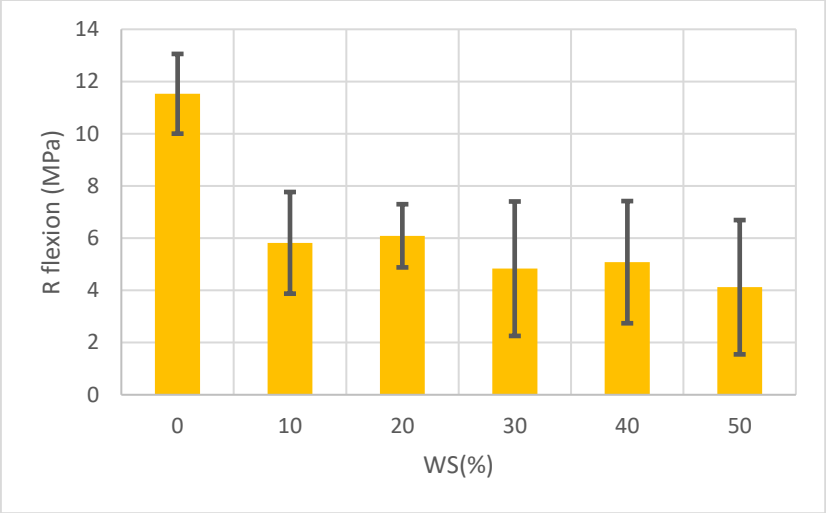


Figure 4-5 la résistance à la flexion des SCWS

4.2.3. Conductivité thermique

Les Figures 4-6, 4-7 et 4-8[187] exposent les résultats concernant la conductivité thermique et sa relation avec les paramètres du béton, révélant une corrélation prononcée entre ces variables. L'augmentation de la proportion de bois se traduit par une réduction claire de la conductivité thermique, celle-ci étant diminuée d'environ 35 % par rapport au béton de référence. Cette réduction est attribuée à l'interaction entre la conductivité thermique inférieure du bois et celle supérieure du béton. L'ajout de copeaux de bois dans le béton réduit la conductivité thermique du composite et augmente ainsi sa capacité d'isolation thermique. Ce comportement est lié au caractère isolant des copeaux de bois, qui possèdent une faible conductivité thermique, des résultats similaires ont été observé par Taoukil et al.[204] , où une augmentation de la teneur en eau a significativement élevé la conductivité thermique du béton.

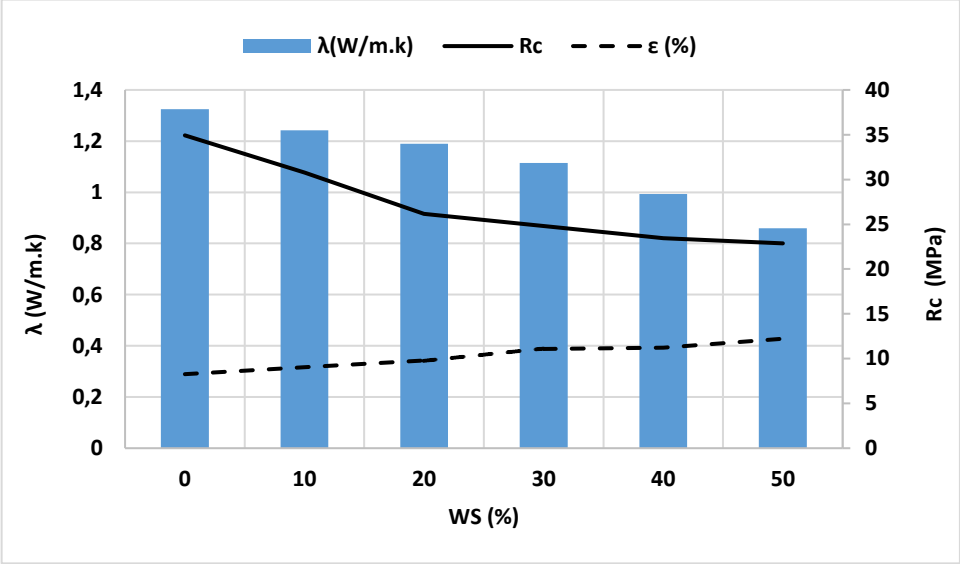


Figure 4-6 Variation de la conductivité thermique, de la résistance à la compression (28 jours) et de la porosité du béton selon le taux WS

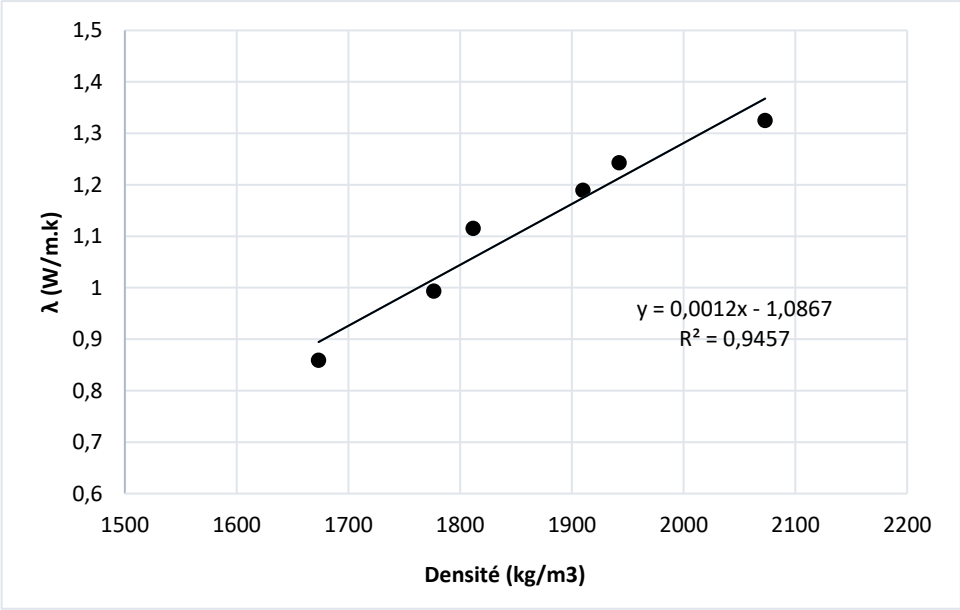


Figure 4-7 Correlation entre la conductivité thermique du béton en fonction de la densité du béton SCWS

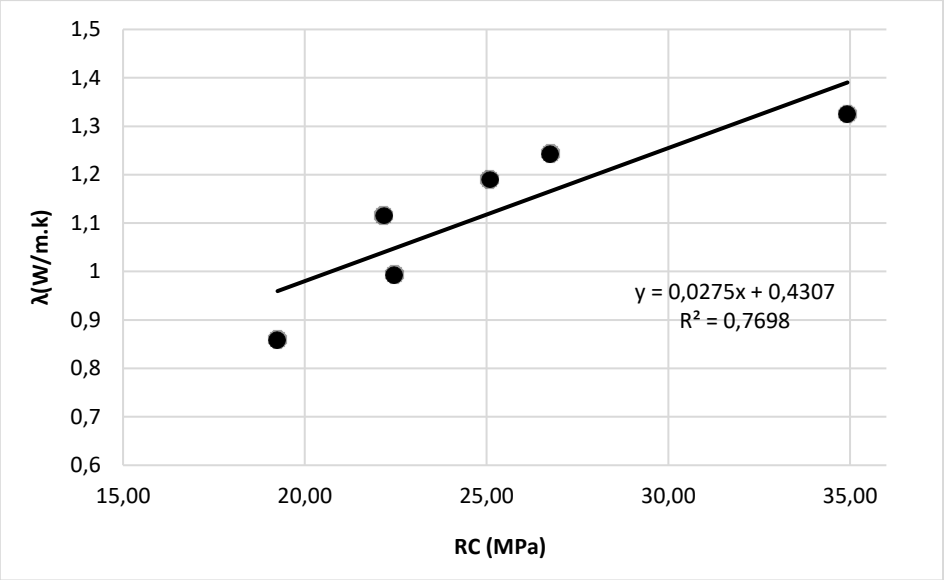


Figure 4-8 Conductivité thermique du béton en fonction de la résistance à la compression du béton

4.2.4. Porosité

La Figure 4-9 montre les résultats de la porosité en fonction de la quantité des copeaux de bois. D'après cette figure, on constate que la porosité augmente de manière plutôt linéaire, allant de 8% pour le béton témoin et atteignant 12% pour 50% de WS. Cette augmentation graduelle pourrait être due à la structure rigide et relativement poreuse des copeaux de bois [209] . En plus, les copeaux de bois, en tant que matériau naturel, ont une structure irrégulière (différentes tailles et formes) et fibreuse qui permet une certaine augmentation de la porosité [201].

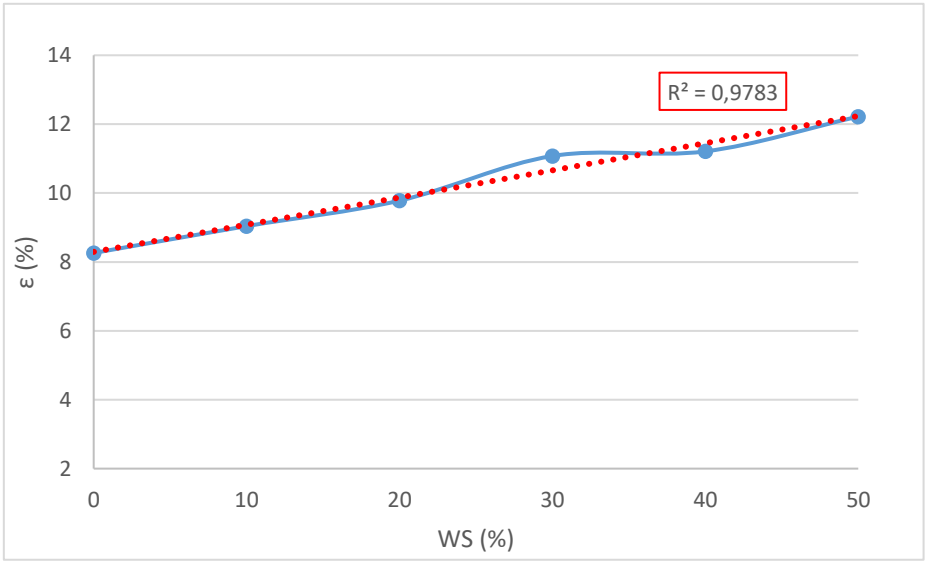


Figure 4-9 la porosité du béton SCWS

4.2.5. Résistance au feu

L'étude a mis en œuvre des températures de 80 °C à 400 °C pour analyser le comportement du nouveau béton face à l'exposition au feu, avec les propriétés mécaniques documentées dans les Figures (4-10 et 4-11)[187], et la perte de masse représentée dans la Figure 4-12[187]. Cette méthode d'analyse pourrait être employée pour vérifier la qualité du béton produit avec des déchets de WS. La Figure 4-13 montre que la perte de masse des échantillons augmente avec le taux de WS et devient plus marquée à des températures plus élevées. Par exemple, pour l'échantillon SCWS10, la perte de masse variait de 2 % à 6 % à 100 °C et 400 °C respectivement, alors qu'elle augmentait de 69 % pour l'échantillon SCWS50. Morales-Conde et al.[201] ont également observé que la quantité de déchets de bois influençait la perte de masse et la dégradation des mortiers. Par ailleurs, les résistances à la compression et à la flexion du béton sont restées inférieures à celles du béton de référence SC, quelle que soit la température testée.

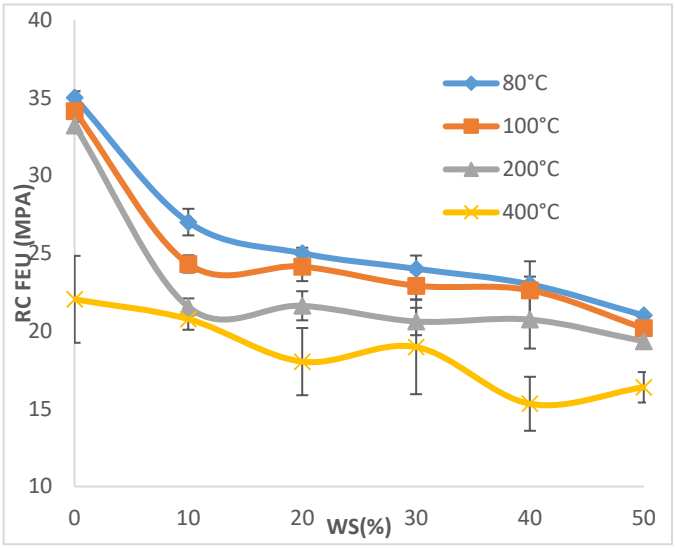


Figure 4-10 Résistance à la compression après exposition à différentes températures

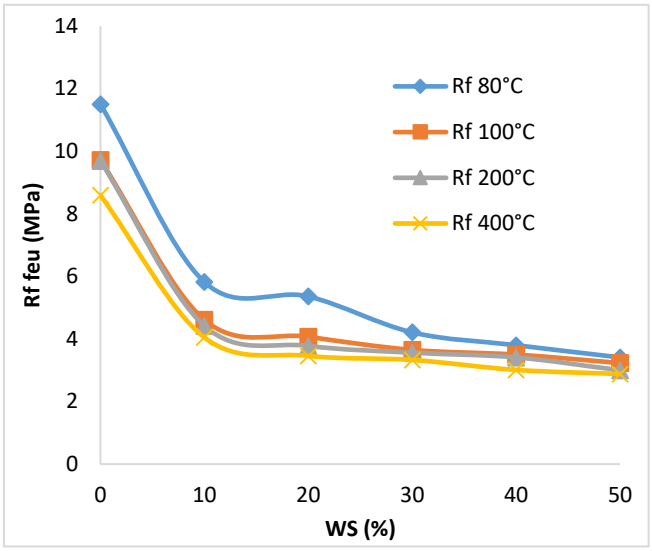


Figure 4-11 Résistance à la flexion après exposition à différentes températures

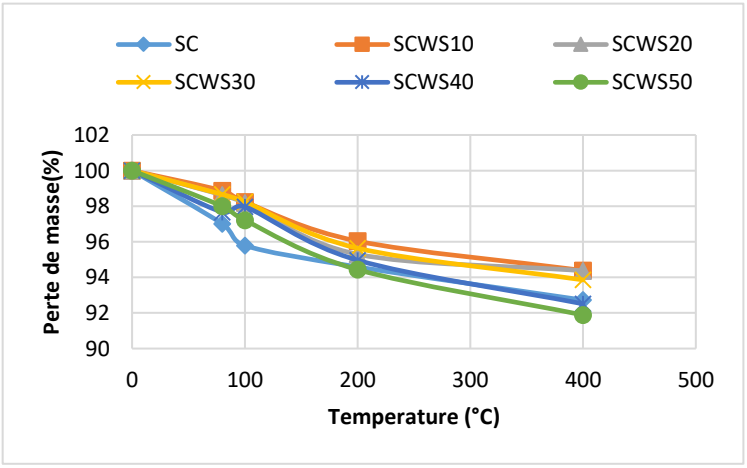


Figure 4-12 Perte de masse du béton due à la température élevée

Les phénomènes de pyrolyse des matériaux lignocellulosiques sont associés à cette baisse de résistance mécanique à haute température. Khan et al. [210] ont observé un ralentissement de la diminution de la résistance à la compression entre 100 °C et 200 °C., tandis qu'Akçaözoglu [211] rapportait que les échantillons conservaient une certaine résistance mécanique aux températures de 150 °C et 300 °C, un phénomène attribué à la réduction des perturbations de vapeur initiales due à l'évaporation de l'eau physiquement liée à 100 °C, selon Hager [212].

4.2.6. Microstructure

Une analyse microstructurale a été réalisée en utilisant des images obtenues par microscopie électronique à balayage (MEB) pour expliquer de manière approfondie certains des résultats obtenus. La microstructure du WS, présentée dans la Figure 4-13(a)[187], révèle principalement deux caractéristiques : des fibres (couche continue) et des particules (agrégats) [213]. Les Figures (4-13(b) et 4-13(c))[187] montrent des vides intercellulaires sous forme de cavités longitudinales partiellement exposées dans les copeaux de bois avant le traitement thermique. Les Figures (4-13(a) et 4-13(b))[187] illustrent une section horizontale des copeaux de bois comportant des tubes horizontaux appelés trachéides. Ces cellules, allongées dans la direction longitudinale, assurent le soutien et la conduction de la sève. Dans l'image agrandie à 1000 fois, les parois épaissies des trachéides sont marquées par des lignes de petits et grands orifices appelés ponctuations (Figure 4-13(a))[187], qui facilitent l'échange de substances avec les cellules voisines, permettant ainsi au mécanisme d'adsorption de fonctionner[191].

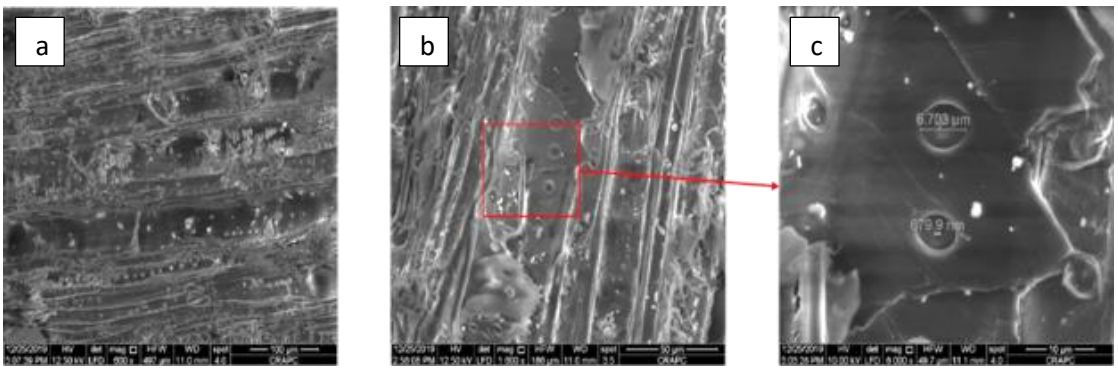


Figure 4-13 Visualisation de la rugosité de surface (a) et de la structure poreuse des copeaux de bois (b)et(c)

La morphologie du WS (Figure. 4-15)[187] suggère une bonne adhérence avec la matrice de ciment [214]. Néanmoins, il apparaît parfois des dommages dans cette composante, comme observé dans les régions entourant le WS dans la même figure. Ces dommages se manifestent par une zone plus poreuse et la présence de fissures autour de l'agrégat léger, conséquences de l'évaporation de l'eau absorbée par le WS et du stress résultant de la perte/gain d'eau [203, 215]. Un effet similaire a été rapporté par Fu et al. (2020), indiquant une faible adhésion entre le WS et la pâte de ciment, ce qui pourrait expliquer la

diminution de la résistance mécanique [164]. En examinant les images SEM, on observe également de nombreux pores dans la matrice de ciment, une porosité attribuée à l'ajout de WS selon Ammari et al. [216]. En conséquence, la présence d'une interface de transition entre les agrégats et la matrice dégrade les propriétés mécaniques du composite en constituant une zone de faiblesse [217].

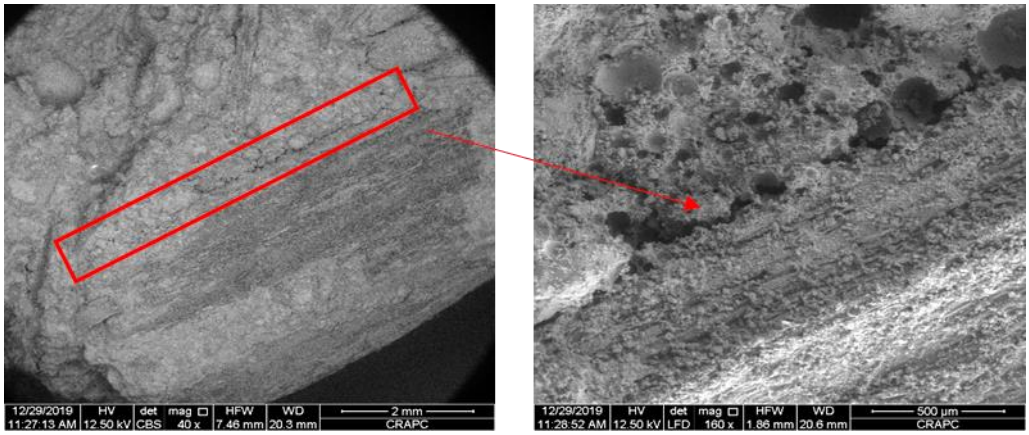


Figure 4-15 Visualisation de la zone de transition d'interface entre TWS et la matrice cimentaire

4.3. Effet de l'incorporations des EPS sur le béton de sable

4.3.1. Effet du traitement du polystyrène

Le premier objectif de ce traitement était de contrer le phénomène de ségrégation en empêchant la remontée des billes de polystyrène expansé (EPS) à la surface des échantillons (figure 4-16 (b)). Des billes d'EPS remontant à la surface de l'éprouvette (figure b) indiquent un phénomène de flottabilité dû à la faible densité de l'EPS par rapport au reste du béton. Les résultats obtenus montrent que la densité de l'EPS a augmenté plus de sept fois, permettant ainsi d'obtenir une surface lisse pour un dosage allant jusqu'à 50 % d'EPS traité, comme l'illustre la figure 4-16 (a)Le second objectif était d'améliorer l'adhérence entre l'agrégat léger et la matrice cimentaire. Ce point sera abordé dans la partie étude microstructurale.

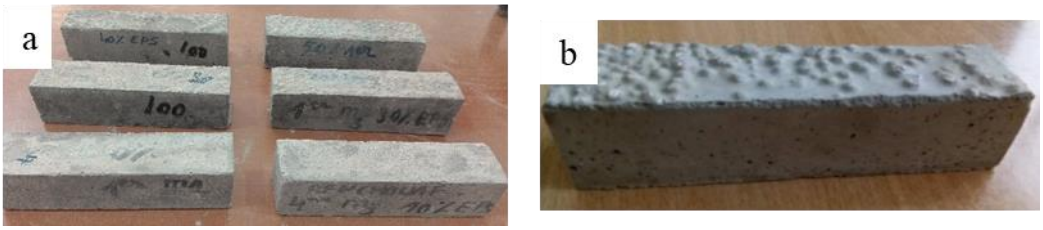


Figure 4-16 Etat des éprouvettes a) après et b) avant traitement des billes de EPS

4.3.2. Maniabilité

Pour évaluer l'ouvrabilité à l'état frais des bétons élaborés, nous avons effectué des essais de maniabilité dont le résultat est quantifié par la mesure du temps d'écoulement. La consistance a été déterminée en ajustant la quantité d'adjuvant afin d'atteindre un temps d'écoulement compris entre 7 et 10 secondes, comme recommandé par sablocrete[3]. Lors de la confection des éprouvettes, la mise en place a été facile, sans aucune tendance à la ségrégation ni au ressuage. Cette performance est attribuée à l'utilisation du superplastifiant, à la fixation de la quantité d'eau.

La Figure 4-17 montre l'effet du pourcentage de polystyrène (EPS) sur le temps d'écoulement de béton de sable. Pour tous les mélanges le temps d'écoulement se situe entre (7 et 10 Sec), avec un rapport E/C fixe. Après un temps de vibration donné, il a été remarqué que la vibration conduit à une ségrégation sur la surface de béton. Sur la base, il a été adopté d'adopter la méthode de compactage expliquée dans le chapitre 3 pour obtenir un béton homogène. Ce résultat concorde avec d'autres résultats de la littérature [218]. Asaad et El Mir [219] ont étudié l'effet du polystyrène sur l'ouvrabilité des bétons légers et ont conclus que l'augmentation du pourcentage de polystyrène inclut une diminution de l'ouvrabilité.

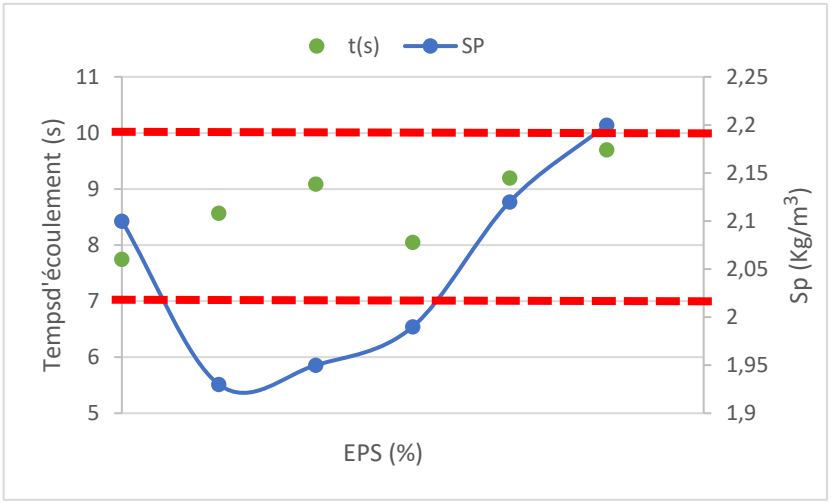


Figure 4-17 Ouvrabilité des bétons de EPS

4.3.3. Densité

La Figure 4-18 illustre la densité des bétons contenant des granulats de polystyrène expansé (EPS), comparativement à celle du béton témoin. L'analyse de cette figure révèle clairement que l'intégration de granulats de EPS entraîne une baisse marquée de la densité du béton. Il est également observé que la réduction de la densité est moins prononcée lorsque la proportion d'EPS dans le béton diminue. À titre illustratif, cette réduction varie de 9 % pour un béton contenant 10 % d'EPS (SCEPS 10 %) à 29 % pour un béton à 50 % d'EPS (SCEPS 50 %). Ces résultats peuvent s'expliquer par la légèreté intrinsèque et la microstructure fortement creuse de l'EPS [220].

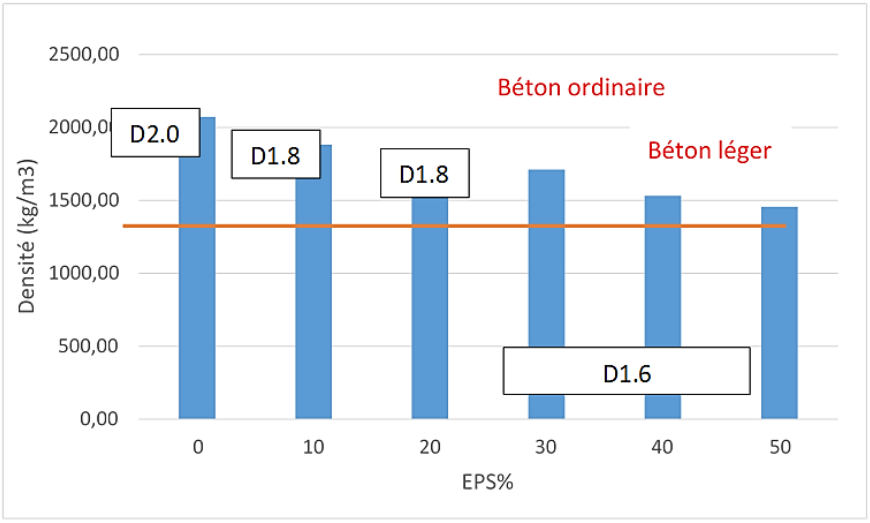


Figure 4-18 Densité des bétons de EPS

Le béton de sable, connu pour sa granularité plus faible, est naturellement plus léger que le béton conventionnel. Par conséquent, le remplacement du sable par des granulats d'EPS, qui sont extrêmement légers, conduit à une réduction supplémentaire de la densité [221]. Ce constat est en accord avec d'autres études qui attribuent ce phénomène à la structure poreuse de l'EPS [222].

De plus, d'après El Gamal et al. [223], il est à noter que les échantillons non compactés ont montré des densités inférieures à celles de leurs équivalents compactés. Cette réduction supplémentaire de la densité des échantillons non compactés pourrait être liée à la présence de davantage de vides d'air dans ces échantillons, ce qui a entraîné une réduction supplémentaire de leur densité par rapport aux échantillons compactés. D'après la norme NF EN 206-1[68], le béton EPS10 est classé dans la catégorie (D2.0) les échantillons EPS20, 30 et 40 % se classent dans la classe (D1.8), tandis que ceux contenant 50% de EPS+WS sont dans la catégorie (D1.6).

4.3.4. Résistance mécanique

- **Résistance à la compression**

La Figure 4-19 montre la relation entre la résistance à la compression et la densité. Il est clair que ces deux paramètres sont proportionnels. Selon la littérature, Cela indique que la corrélation entre la densité et la résistance à la compression peut être clairement prédite par une fonction linéaire, mais la corrélation entre le niveau de remplacement en pourcentage et la résistance à la compression ne peut pas l'être [145].

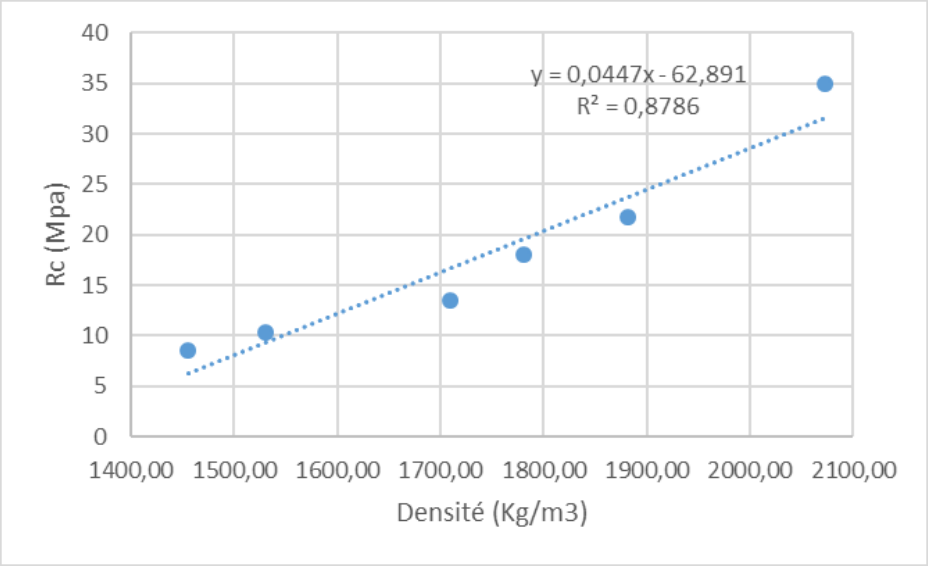


Figure 4-19 Corrélation entre la résistance à la compression et la densité des bétons de EPS

D'après la Figure 4-20, on remarque une diminution drastique de la résistance après l'incorporation de 50% de EPS par rapport au béton témoin atteignant les 75% tandis que pour SCEPS10% elle avoisine les 37%. On déduit alors que l'augmentation du taux de EPS conduit à une perte de résistance à la compression éventuellement à cause de la forme sphérique des billes et l'augmentation de la porosité pendant le malaxage en raison de leur faible densité comme le montre la Figure 4-21.

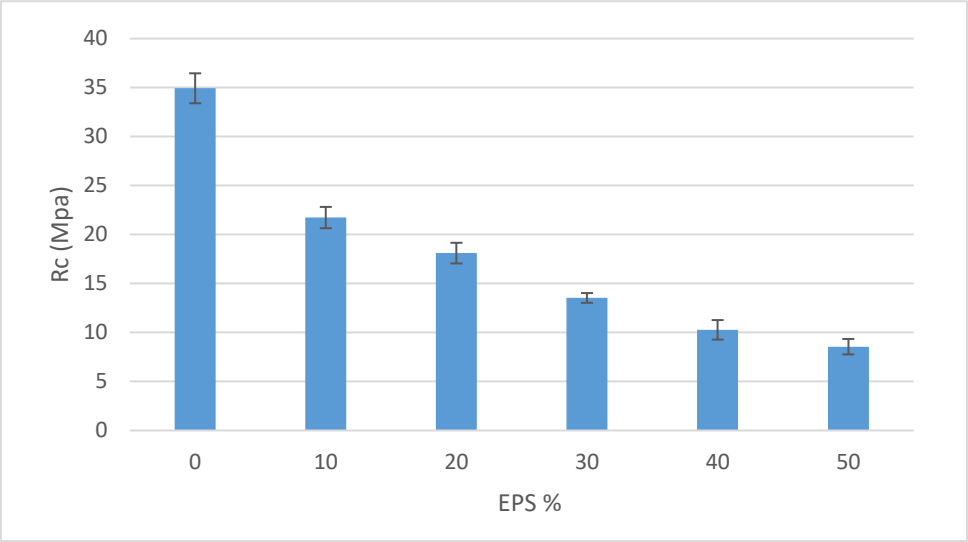


Figure 4-20 Résistance à la compression à 28jours des bétons EPS

La recherche menée par Solomon et Hemalatha [224] est parvenus à la même conclusion. La nature poreuse des billes de EPS est la raison principale de ces résultats. D'autre part, Topacio and Marcos [225] attribuent cette diminution à une seconde cause qui est la mauvaise distribution des particules de EPS. De plus, la substitution du sable par les EPS traités a augmenté la surface spécifique tout en entraînant un manque de contenu en ciment pour enrober toute la surface spécifique.

Selon Carvalho & Motta [226], les bétons avec des billes de EPS présentaient plus de vides. Ce constat est approuvé par les observations microscopiques de l'étude menée par Herihiri [42] sur des échantillons de béton de EPS où est montrée la faible liaison entre les billes de EPS et la pâte de ciment à cause de la nature hydrophobe des billes de EPS.

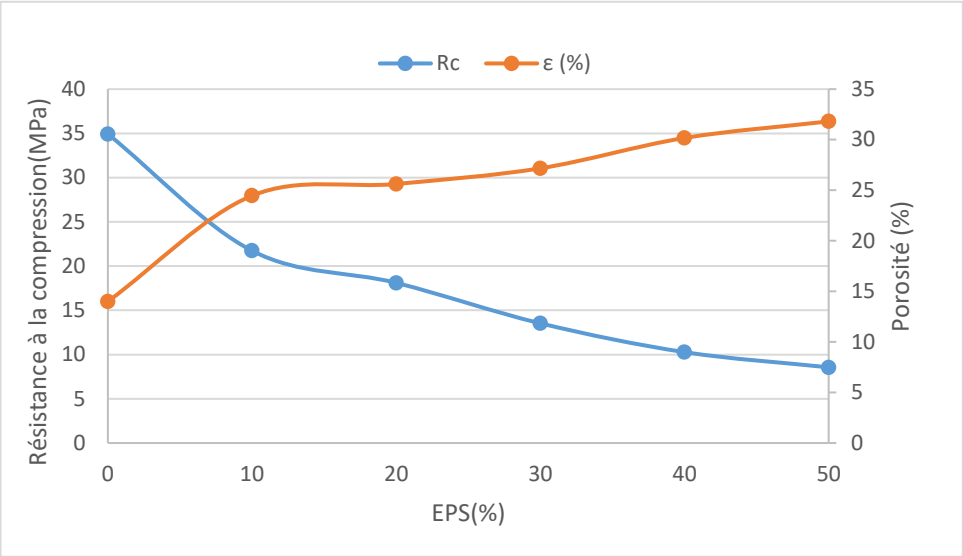


Figure 4-21 Variation de la résistance à la compression et la porosité selon le taux de EPS

- **Résistance à la traction**

Les résultats de l'essai de résistance à la traction par flexion à 28 jours (Figure 4-22) révèlent que le béton contenant 10% de EPS affiche une résistance maximale de 6,72 MPa, soit une marge de 4,81 MPa (41,71%) par rapport au béton témoin. Au-delà de 10%, la résistance à la traction diminue progressivement à mesure que la quantité de EPS augmente dans la matrice du béton. Il est également à noter que la baisse de résistance pour les bétons contenant 10%, 20% et 30% de EPS reste relativement faible à celle observée pour les mélanges SCEPS40 et SCEPS50 où l'on constate une réduction de 69,64% et 74,84% respectivement. Cela peut être attribué à la nature hydrophobe du EPS. Plus la quantité de EPS est importante, moins est la cohésion du matériau, entraînant ainsi un cisaillement à forte dose.

Les résultats de l'étude de Adeala et Soyemi, [227] montrent une augmentation de la résistance à la traction pour les bétons contenant (5%,10%, 15% et 20%) de EPS, et qu'au-delà de cette proportion, la résistance diminue pour les bétons à (30%) de EPS.

Assaad et al [228] ont rapporté que le comportement au cisaillement lors des sollicitations dues au vent et aux séismes des panneaux sandwich contenant des bétons EPS était influencé par la densité des bétons EPS. Des densités plus élevées de bétons EPS ont entraîné une augmentation de la résistance au cisaillement du noyau et des forces d'adhérence interfaciales.

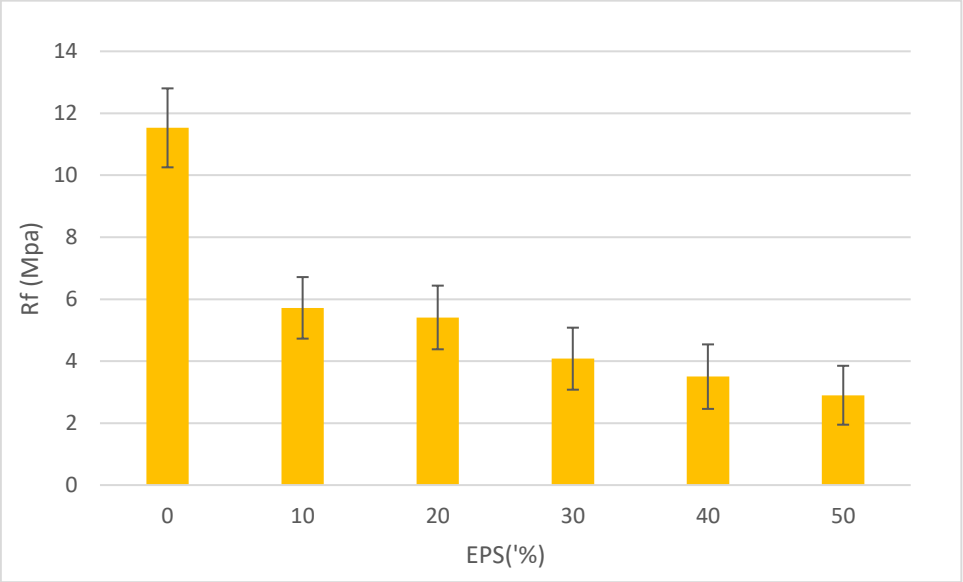


Figure 4-22 Résistance à la flexion des bétons SCEPS

4.3.5. Porosité

Les résultats de la porosité du béton de EPS sont résumés dans la Figure 4-23. Cette figure montre que la porosité augmente rapidement de 5% à 30% lorsque la proportion du EPS égale à 10%. Cette augmentation peut être justifiée par la nature légère et sphérique des billes de polystyrène, qui introduisent de nombreux espaces vides dans la matrice du béton [145]. Au-delà de 10%, la porosité continue d'augmenter, mais à un rythme beaucoup plus lent, atteignant environ 35% pour 50% de EPS. Cette stabilisation peut être attribuée à la saturation des espaces vides que les billes de EPS peuvent créer. Mais à un certain palier, l'ajout de plus de EPS n'augmente plus proportionnellement les vides en raison de l'empilement compact des billes [146].

D'un autre côté, le traitement par acrylique appliqué sur les billes de EPS, pourrait également fournir une certaine rigidité structurelle et aider à maintenir une certaine cohésion dans la matrice, empêchant les billes de s'éparpiller et de réduire ainsi la porosité de manière incontrôlée, càd, en limitant la croissance excessive des pores.

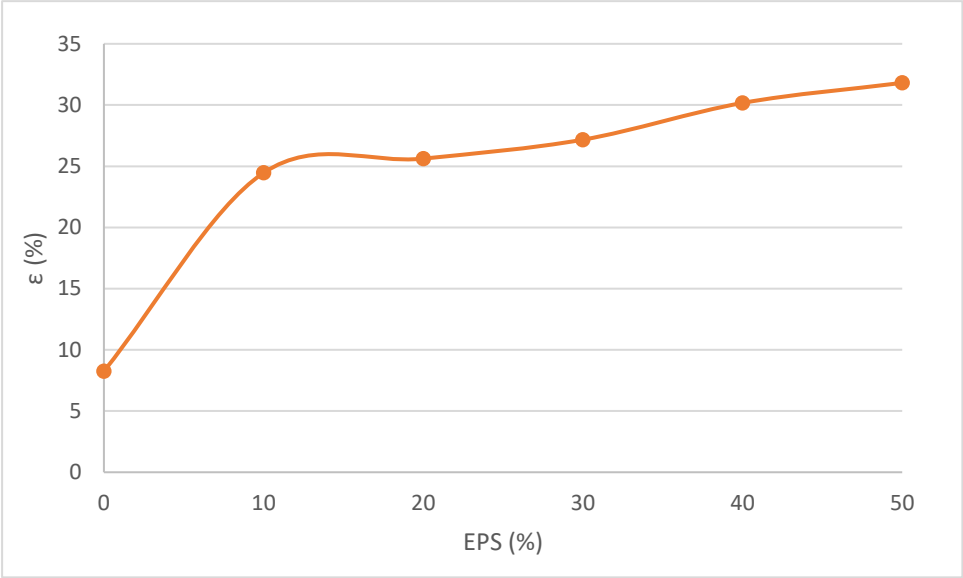


Figure 4-23 La porosité des bétons de EPS

4.3.6. Conductivité thermique

Les Figures (de 4-24 à 4-28) illustrent les résultats de la conductivité thermique et leur relation avec les propriétés du béton. Il existe un lien fort entre ces variables, et la perte de conductivité est nette à mesure que la quantité de EPS augmente figure. Le béton SCEPS50 présente une conductivité qui est environ 50 % inférieure à celle du béton de référence. Cette diminution de la conductivité thermique est due à l'interaction entre la faible conductivité thermique du polystyrène et la conductivité thermique plus élevée du béton.

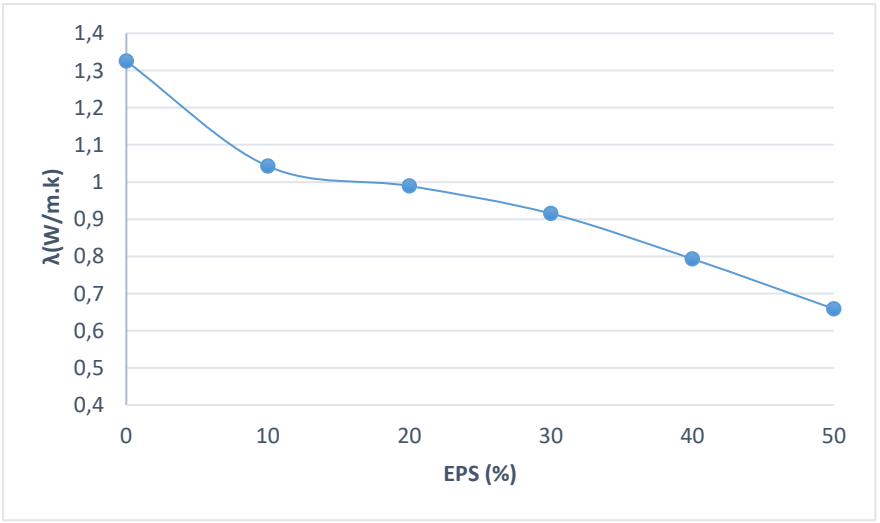


Figure 4-24 La conductivité thermique des bétons SCEPS

De plus, les billes de EPS créent une structure cellulaire poreuse dans la matrice du béton, entraînant une baisse de la conductivité et, par conséquent, une augmentation de l'isolation thermique. Ces résultats sont en accord avec les recherches [229, 230] qui ont observé une diminution de la conductivité thermique dans le nouveau mélange lors de l'ajout de déchets de EPS. En outre, la porosité du béton détermine sa conductivité thermique, qui influe également sur sa résistance mécanique, conduisant à réduire l'efficacité du transfert de charge à travers le béton. Les zones poreuses agissent comme des points faibles ou des discontinuités dans la matrice, où les forces appliquées ne sont pas transmises aussi efficacement que dans un matériau dense [114].

Néanmoins, les valeurs obtenues entrent dans aux valeurs recommandées par les normes pour considérer ces bétons de polystyrène (SCEPS) comme du béton isolant.

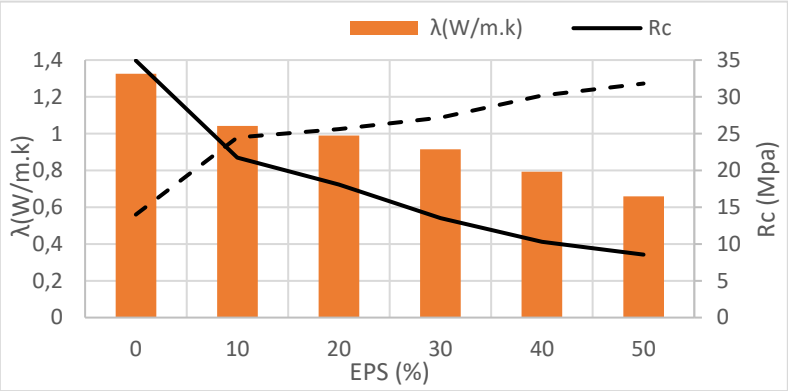


Figure 4-25 Variation de la conductivité thermique, de la résistance à la compression (28 jours) et de la porosité du béton selon le contenu EPS

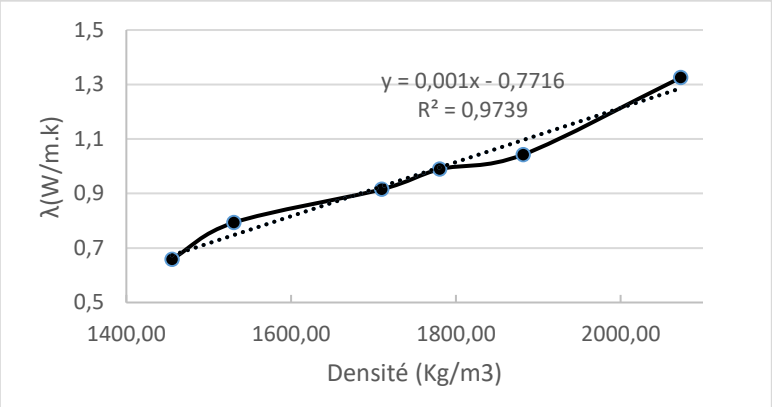


Figure 4-26 Corrélation entre la conductivité thermique et la densité pour SCEPS

Les données recueillies dans cette étude, indiquent une réduction significative de la résistance à la compression du béton incorporant 50% de polystyrène expansé (EPS), avec une diminution de 75% comparativement au béton conventionnel. Cette baisse de performance est directement associée à l'augmentation de la porosité du matériau. Ainsi, alors que les échantillons de béton standard affichent une porosité d'environ 14%, ceux contenant 50% d'EPS enregistrent une porosité élevée atteignant les

32%. Cette relation inversement proportionnelle entre la porosité et la résistance mécanique est également observée dans les mesures de résistance à la traction, où une réduction comparable est constatée pour le béton EPS [219].

Ces observations soulignent que, malgré les avantages en termes d'isolation thermique apportés par l'intégration de l'EPS, des concessions sont nécessaires concernant les applications structurelles qui requièrent une haute résistance mécanique. Néanmoins, le béton EPS demeure une alternative avantageuse pour des utilisations non structurales ou dans des contextes où les sollicitations mécaniques sont faibles, offrant ainsi une solution à la fois légère et isolante [224].

4.3.7. Résistance au feu

Des températures allant de 80 °C à 100 °C, 200 °C et 400 °C sont utilisées pour explorer le comportement du béton SCEPS lorsqu'il est exposé au feu. Les propriétés mécaniques sont présentées dans les Figures 4-27 et 4-28. Ce type d'analyse pourrait être utilisé pour garantir la qualité du béton fabriqué à partir de déchets de EPS. D'après les Figures 4-30 et 4-31, les résistances à la compression et à la flexion sont toutes inférieures à celles du béton de référence SC à toutes les températures. L'augmentation de la teneur en EPS et de la température a entraîné une dégradation de la performance en résistance au feu, par exemple à 400°C et pour des teneurs en EPS de (10, 20, 30, 40, et 50) %, la perte de résistance à la compression était respectivement de (36, 56, 67, 80, 82) %. La même tendance est observée pour la résistance à la traction. De plus, la perte de masse des échantillons varie significativement en fonction du taux de EPS et des températures auxquelles ils sont exposés.

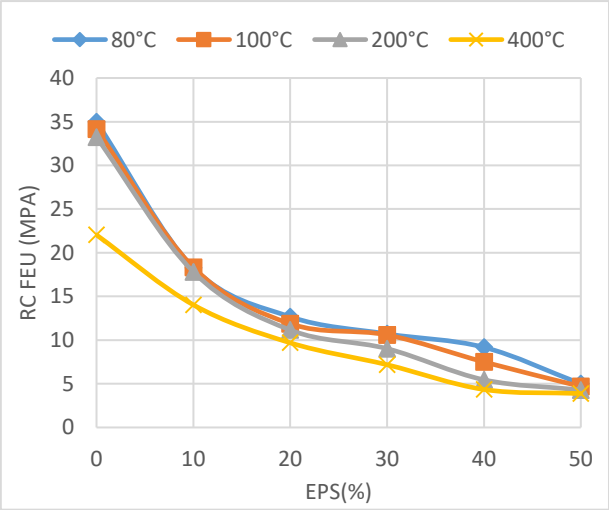


Figure 4-27 Résistance à la compression des SCEPS après exposition à différentes températures

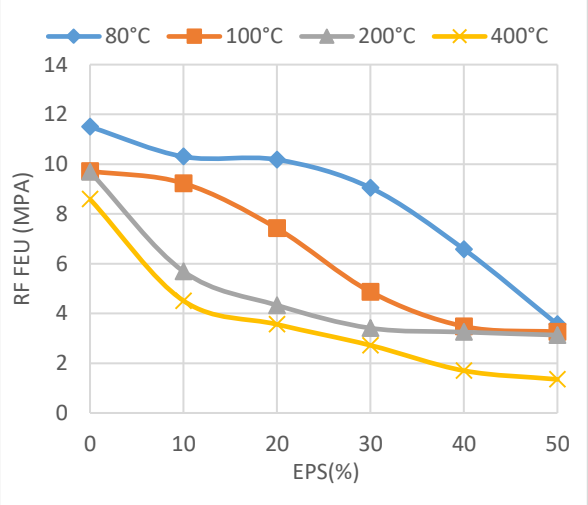


Figure 4-28 Résistance à la flexion des bétons SCEPS après exposition à différentes températures

Pour mieux comprendre les causes de cette diminution de résistance mécanique et de densité, des images MEB et des photographies de certains échantillons sont utilisées en parallèle dans les Figures (4-29 et 4-30).

La Figure 4-29 montre des échantillons de bétons SCEPS50 après exposition au feu. On peut clairement remarquer l'effet de la chaleur sur le polystyrène. On peut l'interpréter comme suit :

- A 80°C et 100°C, les billes traitées ont l'air intactes et ne montrent pas de modification physique et les éprouvettes ne présentent pas de fissuration visible. La perte de masse est relativement faible pour 10% et 20% de EPS par rapport aux échantillons contenant 30% à 50% d'EPS, mais la structure globale du béton reste intacte. Par conséquent, ces résultats sont principalement dus à l'évaporation d'eau. De plus, Il est probable que le traitement acrylique aurait amélioré la résistance thermique du polystyrène en retardant sa dégradation.
- A 200°C on remarque la disparition de 90% du EPS laissant le reste de matière sous forme de substance huileuse collées sur la couche d'acrylique qui enrobée les billes de EPS figure. Cette décomposition thermique du polystyrène entraine une libération de gaz et une perte plus importante de masse et de résistance, ainsi la structure du béton commence à montrer des signes de fragilité en raison de la réduction de la matrice de EPS mais les éprouvettes ne présentent pas de fissuration visible. La perte de résistance est allée de 46% pour SCEPS10 à 87% POUR SCEPS50 par rapport au béton témoin.
- A 400°C, on constate une totale perte de la matière de polystyrène laissant seulement la fine couche (pellicule) d'acrylique quelque peu endommagée (Figure 4-32 et 4-33) ce qui

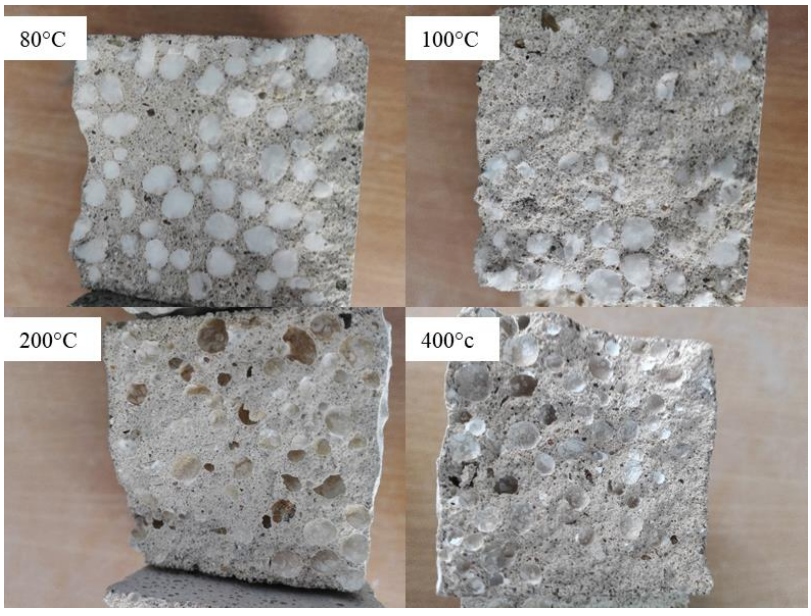


Figure 4-29 des échantillons de bétons SCEPS50 après exposition au feu

conduit à une structure de béton très poreuse et fragile. La masse résiduelle est principalement constituée de composants minéraux du béton.

En résumé, la diminution des propriétés mécaniques et la densité des bétons de polystyrène augmente avec le taux d'EPS et la température. A des températures plus basses (80°C et 100°C), cette perte est principalement due à l'évaporation d'eau et à la déformation thermique initiale du polystyrène. Tandis qu'à des températures plus élevées (200°C et 400°C), la décomposition thermique du EPS devient prédominante, entrainant une perte de masse beaucoup plus importante avec une augmentation de porosité ainsi qu'une dégradation significative de la structure du béton. Il est à noter aussi les analyses microstructurales après exposition à des températures élevées ont révélées moins de décomposition de EPS et une meilleure stabilité structurelle du béton par rapport à la littérature.

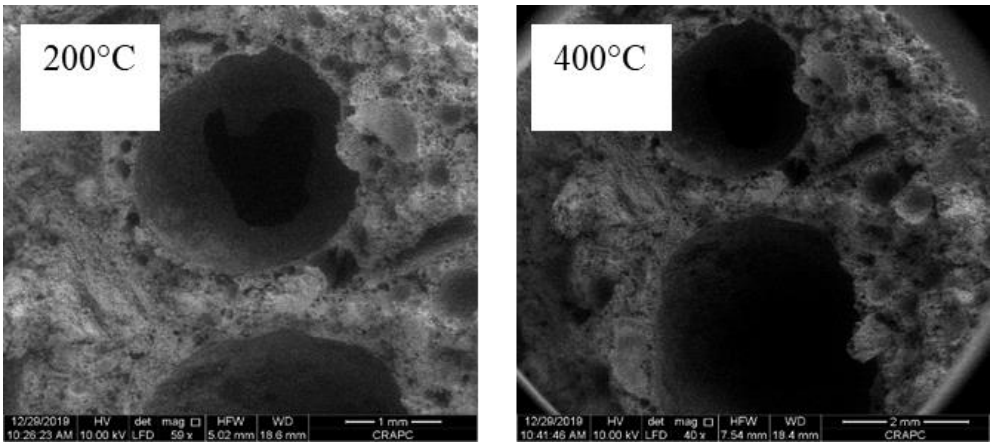


Figure 4-30 Images MEB d'échantillons de SCEPS exposé à différentes températures

D'après la littérature, le polystyrène commence sa fusion formant une pate élastique, au-delà des 100°C à 150°C. après ce seuil de température et jusqu'à 250°C, cette pâte se décompose à cause de la désorption des liaisons intermoléculaires la transformant en une substance fluide et huileuse. Enfin, la combustion et inflammation du polystyrène occurrent à 300°C [42, 231]. Donc ceci conduit à la formation d'une porosité supplémentaire en plus de l'évaporation de l'eau et de la pression de la vapeur dans les pores capillaires. De même, d'après Sayadi et al. [132] les billes de EPS à l'intérieur des bétons se sont rapidement rétractées et la performance mécanique a alors été perdue. Lo Monte et al. [232] ont étudié le comportement résiduel à température élevée des bétons EPS. Dans leur étude, les billes de EPS ajoutées variaient en particules grossières et fines. D'après eux, les résultats modélisés indiquaient que les billes de EPS plus fines résistaient plus efficacement à l'exposition au feu que les billes de EPS plus grossières. Hajdukovic et al. [233] ont fabriqué des panneaux d'isolation en béton EPS pour l'application en façade et ont testé les panneaux sous feu. Les auteurs ont trouvé que, après l'exposition au feu, le composant EPS était dégradé, rétracté et fondu en premier, et le composant béton était celui qui supportait la charge structurellement. De plus, Vilches et al. [234] ont développé des bétons EPS

moussés ultra-légers avec des densités variant entre 150 et 700 kg/m3 et ensuite testés sous feu. Les résultats des tests indiquaient que l'augmentation des densités du béton conduisait à une meilleure résistance au feu. De même, Sayadi et al. [132] ont examiné la résistance au feu du béton contenant différents pourcentages d'EPS. Ils ont observé qu'une résistance au feu plus faible était obtenue pour les spécimens avec un contenu plus élevé d'EPS en raison du retrait de ce volume élevé de la matrice comparé aux mélanges de béton contenant une quantité moindre d'EPS.

Néanmoins, d'après Ferrandez-Mas et García-Alcocel [141], l'EPS avait un effet positif sur la résistance à la compression des mortiers soumis à des cycles thermiques. Selon eux, cela pourrait être dû à l'amélioration de l'interface entre la pâte de ciment et l'EPS ainsi qu'à la pâte de ciment elle-même. De plus, Vilches et al. [234] ont constaté que lorsque les étaient au-dessus de 250 kg/m^3, les résultats des tests montraient qu'un matériau résistant au feu était obtenu et pouvait agir comme remplissage pour les panneaux muraux. Cependant, bien que la performance au feu des bétons contenant des billes de EPS soit supérieure à celle du béton normal, la libération de toxicité des billes de EPS après le feu reste demeurait la limitation pour l'utilisation future de ce matériau.

4.3.8. Microstructure

Une analyse microstructurale a été réalisée à l'aide d'images de Microscopie Électronique à Balayage (MEB) afin d'observer la morphologie des billes d'EPS, l'effet du traitement par acrylique, et l'impact de l'introduction du polystyrène sur le béton de sable. Les figures présentées montrent des images MEB des échantillons après 28 jours de cure. Cette visualisation permet d'apprécier différents niveaux de détail et de grossissement.

En premier plan, on peut observer l'aspect externe d'une bille d'EPS avant et après traitement. La Figure 4-31(a) montre une bille de polystyrène avant traitement. On peut voir la bille dans son ensemble, ce qui donne une idée de sa morphologie initiale. La bille a un diamètre de 4,199 mm, et sa surface apparait relativement lisse et homogène.

La Figure 4-31 (b), affiche une perle de EPS après traitement par une couche d'acrylique. Une partie a été sélectionnée pour révéler l'intérieur et l'interface entre le polystyrène et la couche d'acrylique. Ensuite, la Figure (b1) offre un zoom sur la structure alvéolaire du polystyrène, on observe une structure poreuse complexe avec des alvéoles de différentes tailles. Cette structure alvéolaire est typique du polystyrène expansé (EPS) et contribue à ses propriétés de faible densité, son caractère hydrophobe et aux propriétés d'isolation thermique du composite [223].

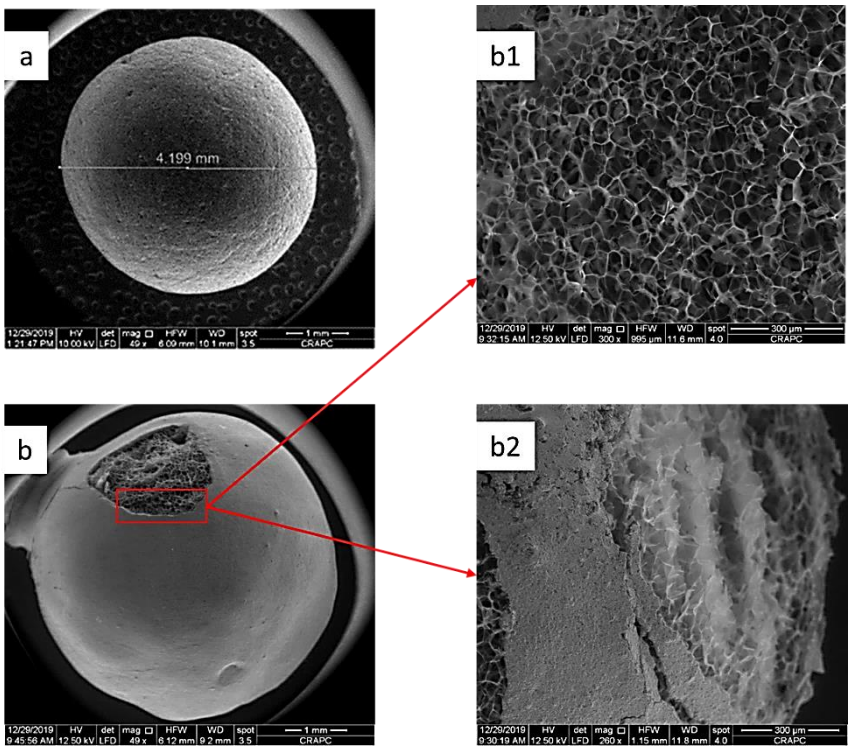


Figure 4-31 Images MEB de la morphologie des billes d'EPS a) avant et b) après traitement

La Figure 4-32, illustre l'interface entre le polystyrène et la couche d'acrylique. La transition entre les deux matériaux est clairement visible. On remarque que cette couche de traitement forme une barrière protectrice. La couche d'acrylique donne à la bille un aspect plus rugueux, ce qui est attendu pour améliorer l'adhésion à la matrice cimentaire.

L'objectif secondaire du traitement était d'améliorer l'adhérence entre l'agrégat léger et la matrice cimentaire. La littérature soutient cette approche, plusieurs chercheurs s'accordant sur le fait que la surface des billes influence significativement leur liaison avec la pâte de ciment [50]. Par ailleurs, Yang Ke [113] a signalé que, dans le cas d'agrégats à faible capacité d'absorption et lorsque le rapport eau/ciment est élevé, une zone de transition peut se former.

L'examen de la Figure 4-32(a) montre une vue d'ensemble d'une bille de EPS traitée découpée encapsulée dans la matrice cimentaire. De plus, cette figure révèle que la matrice cimentaire contient des vides dispersés, qui peuvent être des pores d'air engendrés par l'introduction du EPS lors du malaxage.

Un agrandissement de la zone encadrée en rouge dans la Figure 4-32 (b) montre l'interface de transition soit inexistante soit, soit négligeable, ce qui indique une bonne adhérence entre la bille traitée et la matrice cimentaire. L'absence de fissures ou de zones de délamination à l'interface confirme l'efficacité du traitement de surface pour améliorer la compatibilité entre le granulat léger et la matrice cimentaire.

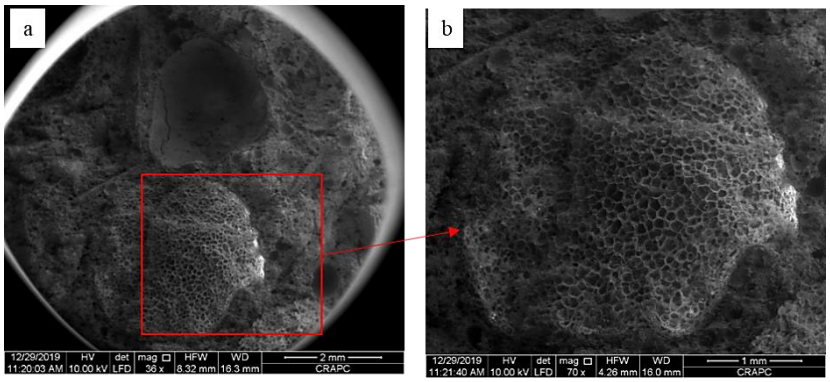


Figure 4-32 Image MEB d'vue d'ensemble d'une bille de EPS traitée découpée encapsulée dans la matrice cimentaire

4.4. Effet de l'incorporations des WS et EPS sur le béton de sable

4.4.1. Maniabilité

Pour chaque pourcentage de LWA, la quantité de superplastifiant a été augmentée afin de compenser la perte de fluidité et de maintenir le temps d'écoulement dans la plage cible (7-10 secondes). Pour pouvoir comparer les résultats des bétons (EPS, WS et EPS+WS).

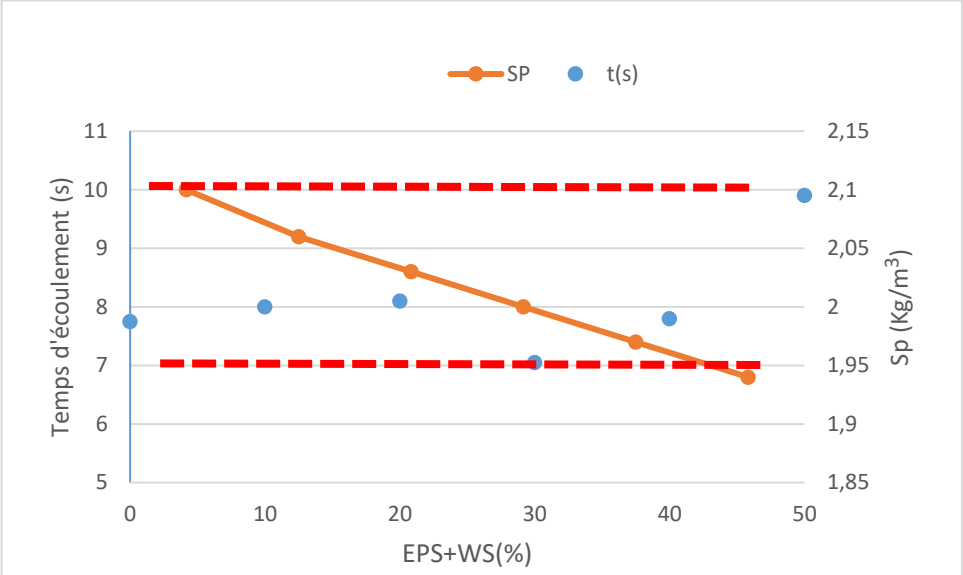


Figure 4-33 Variation du temps d'écoulement du Béton de EPS+WS

4.4.2. Densité

La Figure 4-34 présente l'effet de la substitution du sable par le EPS et les WS, sur la densité du béton SC. On remarque une diminution de la densité pour tous les pourcentages, ce résultat est logique et attendu, cette baisse de densité est passée de 7,86% pour EPS+WS10 à 23,35% pour 50% de LWA. Tous les échantillons testés répondent donc à cette classification. D'après la norme NF EN 206-1[67], les échantillons EPS+WS20, 30 et 40 % appartiennent à la classe (D1.8), tandis que ceux contenant 50% de EPS+WS se classent dans la catégorie (D1.6).

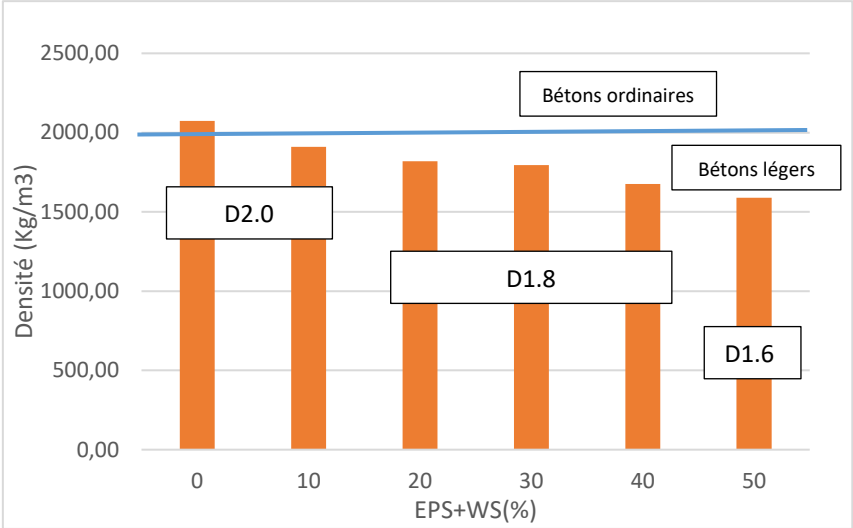


Figure 4-34 Densité du béton EPS+WS

Pour mieux comprendre d'effet de l'incorporation des EPS+WS sur la densité, une comparaison entre les trois types de bétons (SCEPS, SCWS et EPS+WS) est résumée sur la Figure 4-35. Ce paramètre a été mesuré pour différents pourcentages de LWA.

On observe que les trois types de béton présentent une densité nettement inférieure à celle du béton témoin et ont la même tendance, càd que la densité diminue à mesure que la quantité des LWA augmente. Cependant, cette diminution est plus prononcée pour le béton de EPS, tandis que le béton de WS semble le moins affecté. Le béton EPS+WS affiche des valeurs situées entre ses deux précédents.

Ceci pourrait être attribué par le fait que d'une part, le polystyrène soit un matériau léger avec une faible densité et ses particules créent des zones faibles dans la matrice de béton. D'autre part, les copeaux de bois ajoutent une certaine porosité au béton, ce qui peut réduire sa densité. La substitution du sable par des matériaux plus légers est un autre facteur, cependant, le fait que le EPS possède une masse volumique inférieur à celle des WS, donc, l'allègement est moins prononcé pour ce dernier en raison de l'écart des masses volumiques entre EPS et WS. El Gamal et al.[223] a remarqué que ces bétons légers n'étant pas compactés, la diminution de la densité est plus grande.

Finalement, le mélange (EPS+WS) présente une densité intermédiaire combinant les effets de réduction de poids du polystyrène et des copeaux de bois. Ceci confirme les résultats d'autres chercheurs [235-237] qui ont trouvé aussi que la densité du mortier est diminuée d'une façon considérable en fonction du pourcentage de substitution du sable par du polystyrène ou des copeaux de bois.

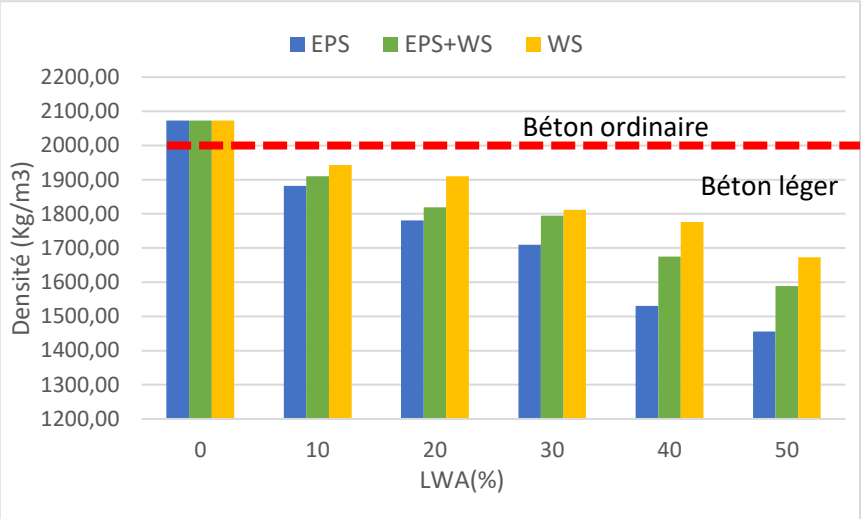


Figure 4-35 Comparaison de la densité des béton EPS, WS, et EPS+WS

4.4.3. Résistances Mécaniques

- **Résistance à la compression**

Les résultats de la résistance à la compression sont résumés sur la Figure 4-36. Il est clair que l'augmentation du taux de EPS et WS influe négativement sur la résistance. La Figure 4-37 montre une bonne corrélation entre la résistance à la compression et la densité. Le béton témoin affiche une valeur de résistance de 34,93 MPa, tandis que cette valeur passe de 24,34 MPa pour 10% de LWA à 16,53 MPa pour 50% de LWA, soit un taux de réduction de 52,67% par rapport au béton SC.

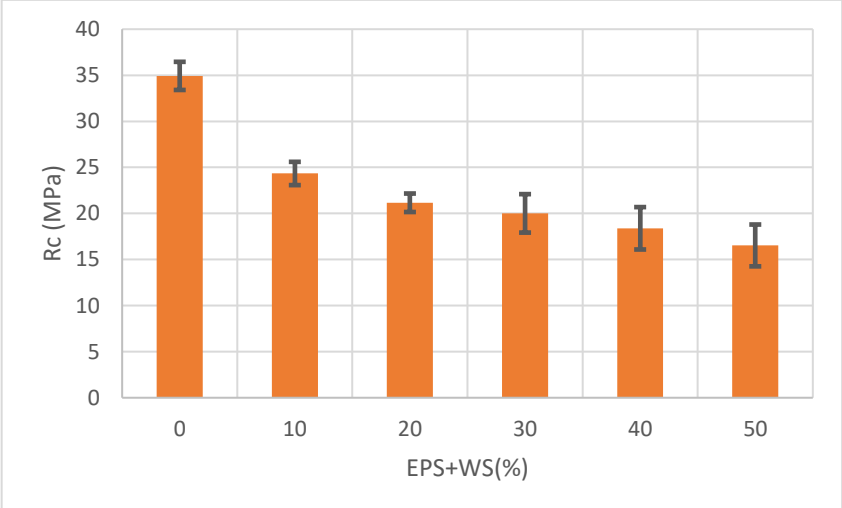


Figure 4-36 La résistance à la compression pour le béton EPS+WS

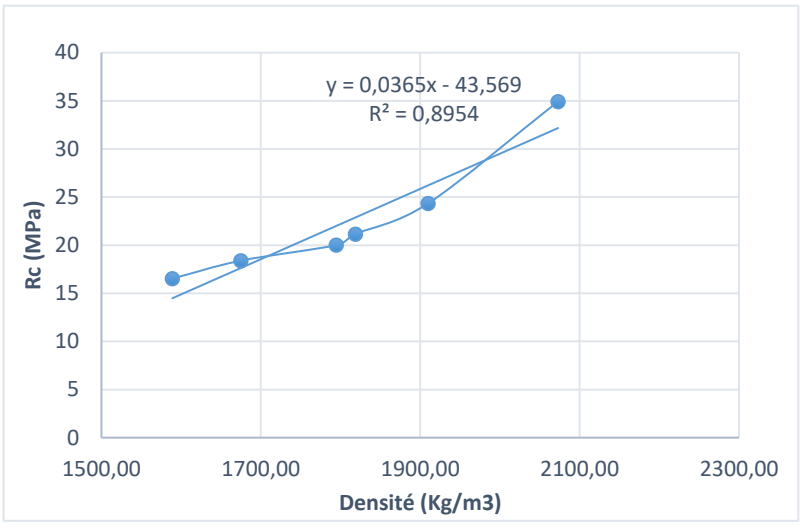


Figure 4-37 Corrélation entre la résistance à la compression et la densité pour le béton EPS+WS

Pour mieux comprendre l'effet du mélange, la Figue 4-38 donne une comparaison sur la résistance pour chaque type de béton. Les trois types de béton ont une résistance inférieure à celle du béton témoin, cependant, la baisse de résistance est plus marquée pour le béton de EPS. En revanche, le béton de WS manifeste les meilleurs résultats, tandis que le béton EPS+WS offre des résistances intermédiaires entre les deux autres. Ces résultats peuvent être expliquées par le fait que le polystyrène possède une plus faible densité que les WS et manifeste une mauvaise distribution dans le béton [42]. Par ailleurs, les copeaux de bois ajoutent une certaine porosité au mélange, ce qui conduit à réduire la densité et la résistance mécanique. Sotiropoulou et al. [237] attribuent cette diminution à la faible adhérence de la pâte de ciment et des copeaux de bois, par rapport à l'adhérence de la pâte de ciment et des granulats conventionnels. Néanmoins, les fibres de bois peuvent améliorer la ductilité du béton et sa capacité à répartir les charges [184]. Par conséquent, le mélange EPS+WS, combine la légèreté du polystyrène et la capacité des fibres de bois à améliorer la ductilité et la répartition des charges.

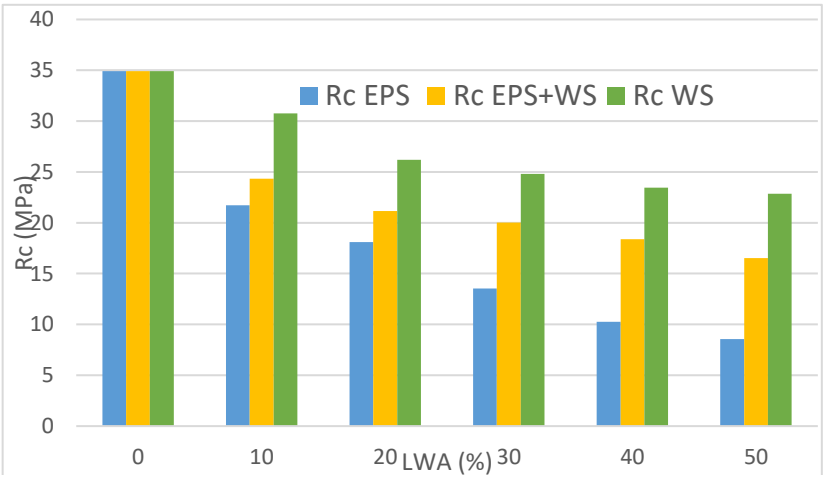


Figure 4-38 Comparaison de la résistance à la compression des béton EPS, WS, et EPS+WS

Le tableau suivant résume les valeurs de résistance à la compression pour les trois types de béton. On peut constater que pour la combinaison (EPS+WS), ce sont les WS qui ont le plus contribués dans ces résultats car les valeurs de résistance sont plus proches de celle des WS que des EPS.

Tableau 4-1 Comparaison de la densité des béton EPS, WS, et EPS+WS

	0%	10%	20%	30%	40%	50%
Rc(MPa) WS	34,93	30,76	26,18	24,81	23,46	22,87
Rc(MPa) EPS+WS	34,93	24,34	21,16	20,01	18,39	16,53
Rc(MPa) EPS	34,93	21,73	18,10	13,53	10,27	8,55

Le Tableau 4-1 montre que l'augmentation du pourcentage de granulats légers entraîne une diminution progressive de la résistance à la compression des bétons étudiés. Cette baisse est plus marquée pour le béton contenant uniquement du polystyrène expansé (EPS), en raison de sa faible rigidité et de son manque d'adhérence à la matrice cimentaire, ce qui accroît la porosité. En revanche, les copeaux de bois (WS) préservent mieux la résistance mécanique grâce à une meilleure cohésion avec le ciment. Le béton combiné (EPS+WS) affiche des résistances intermédiaires, plus proches de celles du béton WS, indiquant que les copeaux de bois jouent un rôle structurant dans le mélange. Ainsi, l'utilisation conjointe de EPS et WS permet de limiter la perte de résistance tout en réduisant la densité du béton.

- **Résistance à la traction**

Les résultats de la résistance à la flexion sont montrés dans la Figure 4-39. En comparant les résultats de la substitution du sable par le EPS, WS, et EPS+WS en terme de résistance à la compression et à la flexion, on remarque le même effet sur ces deux paramètres. Càd la résistance à la flexion diminue à mesure que le taux de substitution augmente. A titre d'exemple, pour le mélange EPS+WS, la baisse de résistance passe à 54% pour 10% de LWA. Pourtant, la résistance à la flexion est influencée différemment en raison de la nature des matériaux introduis. D'après la Figure 4-39, on remarque que la résistance à flexion du béton EPS est inférieure à celle du béton témoin et les deux autres types de béton en raison de la faible résistance mécanique du polystyrène et la mauvaise distribution des billes dans la matrice cimentaire, donc une distribution inégale des contraintes sous des charges de flexion, ce qui peut créer des fissures prématurées et des zones de faiblesse dans le béton. D'autre part, le

béton de WS, manifeste les meilleures performances mécaniques. Cela pourrait être attribué à sa ductilité, ce qui permet aux fibres de bois de mieux absorber et distribuer les contraintes appliquées [214]. Ces fibres permettent aussi le pontage des fissures, càd relier les deux côtés d'une fissure et retardent ainsi sa propagation. Baltazar [238] justifie ce résultat par la structure fibreuse des déchets de bois qui aide le mortier à résister aux contraintes de traction. Enfin, le béton (EPS+WS) manifeste des valeurs intermédiaires mais de même que pour les résultats de la résistance à la compression, il semble que l'influence des copeaux de bois y soit plus importante que celle du polystyrène.

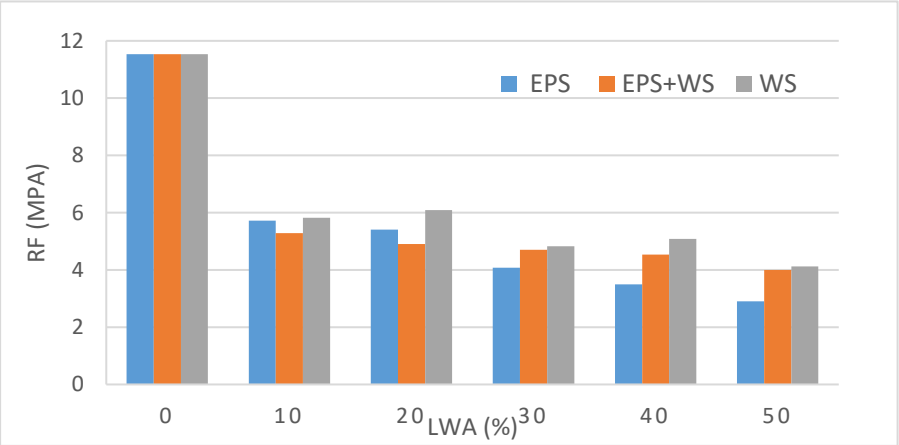


Figure 4-39 Comparaison de la résistance à la flexion des béton EPS, WS, et EPS+WS

4.4.4. Conductivité thermique

La Figure 4-40 montre les données de conductivité thermique des échantillons du béton EPS+WS après 28 jours. La conductivité thermique a tendance à diminuer à mesure que le taux des granulats EPS+WS augmente. La baisse de conductivité passe de 25% pour le mélange EPS+WS10 à 54% pour le taux de substitution maximale de 50%.

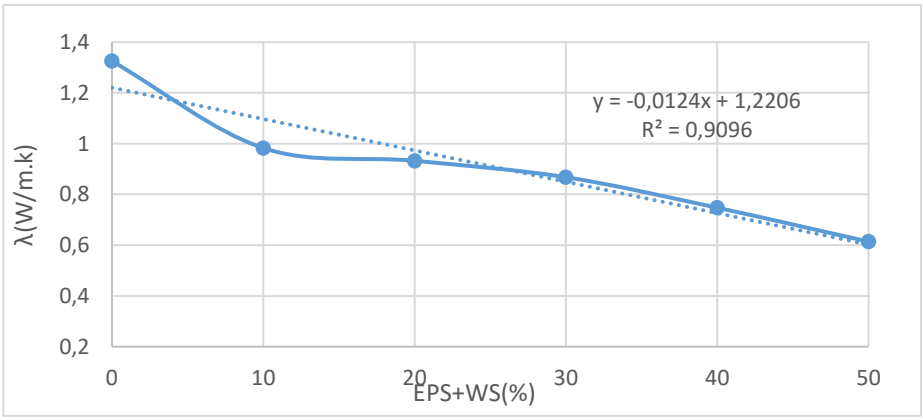


Figure 4-40 La conductivité thermique des bétons à base de EPS+WS

Ensuite, la Figure 4-41 donne la relation entre la conductivité thermique, la résistance à la compression et la porosité, on constate que la conductivité thermique diminue de manière significative avec l'augmentation de pourcentage de granulats légers. Cela indique que l'ajout du polystyrène et des copeaux de bois améliore les propriétés isolantes du béton, comme rapporté par Demirel [136] et Corinaldesi et al. [209]. De même, on observe que la résistance à la compression diminue initialement avec l'ajout des LWA, mais elle devient moins prononcée après 10% de substitution. Cela prouve que les granulats légers réduisent la capacité portante du béton, mais cet effet se stabilise après un certain point. Ensuite, on remarque que la porosité augmente rapidement avec le taux initial de LWA, puis se stabilise autour de 30%. Cette augmentation est attendue en raison de la nature des granulats légers qui introduisent plus de vides dans la matrice du béton [203, 229].

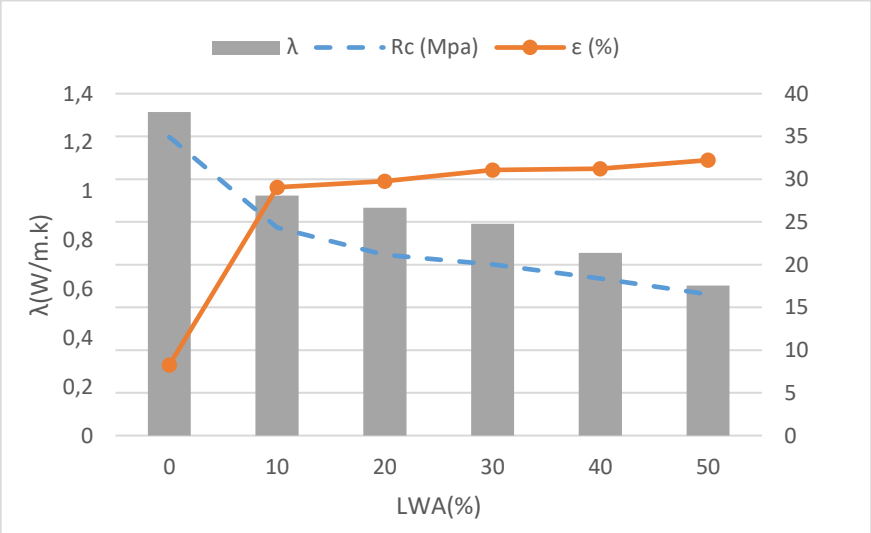


Figure 4-41 Variation de la conductivité thermique, de la résistance à la compression (28 jours) et de la porosité du béton selon le taux de EPS+WS

D'après ces observations, on peut déduire que, l'ajout du polystyrène et des copeaux de bois améliore l'isolation thermique du béton au détriment de sa résistance mécanique. Ces résultats sont conformes à la norme NF EN 206-1[67] qui indique que les bétons légers possèdent une conductivité thermique inférieur à (1 W/m·K). Cependant, un compromis semble être trouvé avec des pourcentages modérés de granulats légers où les propriétés mécaniques sont suffisamment stables.

Enfin, la Figure 4-42 donne la comparaison entre les trois types de bétons légers de cette étude. Il est clair que le béton de EPS+WS montre les valeurs de conductivité thermique les plus faibles par rapport aux béton de EPS et celui de WS. Ceci indique que l'ajout des LWA a réduit significativement la conductivité thermique du béton améliorant ainsi ses propriétés isolantes. De plus, la porosité accrue est directement liée à la diminution de la conductivité thermique, confirmant que l'air piégé dans les pores agit comme isolant. D'après Zare et Kargarila réduction supplémentaire de la conductivité thermique est due à la très faible conductivité thermique de l'air (0,0257 W/mK) [239]. Il est à noter que c'est le polystyrène qui a le plus contribué à ce résultat comparé aux copeaux de bois. Conduisant ainsi à avoir un béton avec de meilleurs performances en termes d'isolation thermique.

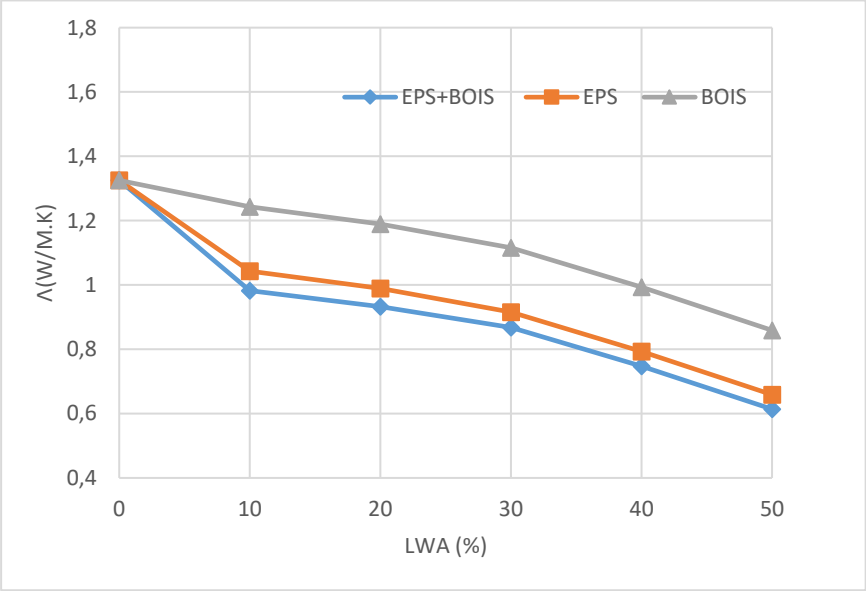


Figure 4-42 Comparaison de la conductivité thermique des béton EPS, WS, et EPS+WS

4.4.5. Porosité

La Figure 4-43 montre l'évolution de la porosité en fonction de la quantité de (EPS+WS). On observe, une augmentation significative de la porosité pour 10% de LWA. Cela pourrait être attribué à la quantité de vides supplémentaires résultats de l'introduction des granulats légers en raison de leur nature poreuse et de leur mauvaise distribution dans la matrice du béton. Laoubi et al. [240] justifient ce phénomène par la faible adhérence entre la matrice de ciment et les perles EPS qui sont caractérisées par une nature hydrophobe dans laquelle les cellules en forme d'alvéoles sont fermées et retirent une partie de la matrice entraînant une porosité plus complexe.

Ces résultats sont semblables à ceux d'autres chercheurs [241] qui ont étudié l'effet de la teneur en EPS et en WS [238] sur la porosité du béton. Les résultats ont montré une augmentation de la porosité avec l'inclusion d'une teneur élevée en ces granulats légers par rapport aux mélanges témoins.

D'autre part, la porosité semble se stabiliser autour de 30%. Cela indique qu'il y a une limite à la quantité de porosité que ces matériaux peuvent introduire dans le béton. Une fois cette limite atteinte, l'ajout supplémentaire de EPS+WS n'augmente pas significativement la porosité. Enfin, cette stabilisation peut également affirmer que les nouveaux vides créés commencent à être compensés par une densification ou un meilleur arrangement des composants du béton.

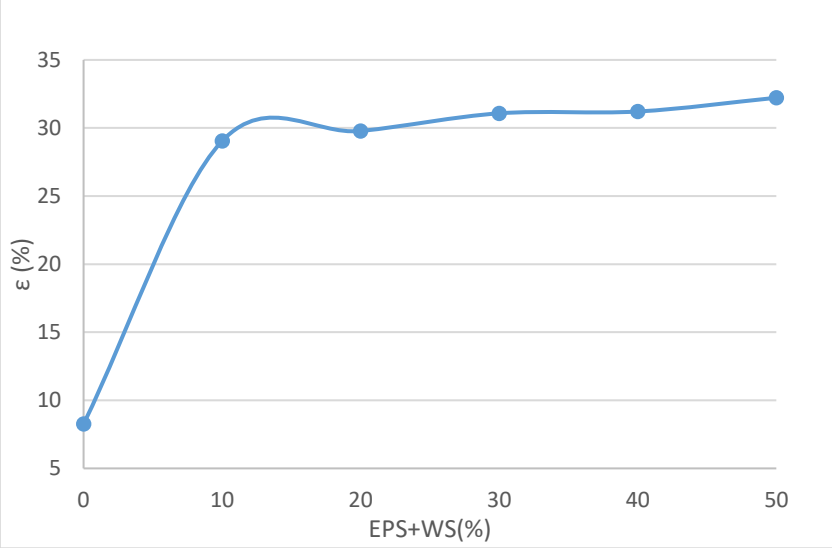


Figure 4-43 l'évolution de la porosité en fonction de la quantité de (EPS+WS)

La Figure 4-44 compare l'évolution de la porosité et de la conductivité thermique en fonction du pourcentage de EPS+WS. On remarque une rapide augmentation de la porosité qui se stabilise au-delà de 10% de EPS+WS. De l'autre côté, la conductivité thermique diminue de manière significative. Ce phénomène peut être expliqué par le fait que ces deux matériaux à savoir le polystyrène et les copeaux de bois possèdent des propriétés isolantes. Kaya et Kar [242] ont également mené une expérience impliquant du béton fabriqué à partir de différentes compositions de déchets EPS, de ciment et de résine adragante. Ils concluent que le béton avec un rapport élevé entre EPS, ciment et résine présente une porosité élevée et une faible densité, conductivité thermique, contrainte de compression et de traction.

La stabilisation de la porosité s'explique par les interactions entre les copeaux de bois et la matrice cimentaire, qui limitent la formation de nouveaux vides. En revanche, la conductivité thermique continue de diminuer, car la proportion de matériaux à faible conductivité (EPS et WS) augmente, réduisant ainsi la transmission de chaleur, même sans augmentation significative de la porosité. De plus, la diminution de la conductivité thermique avec l'augmentation de la porosité indique que l'introduction de vides et de matériaux isolants dans le béton réduit sa capacité à conduire la chaleur. Cette relation inverse est essentielle pour les applications nécessitant une isolation thermique améliorée, notamment dans les constructions éco-énergétiques.

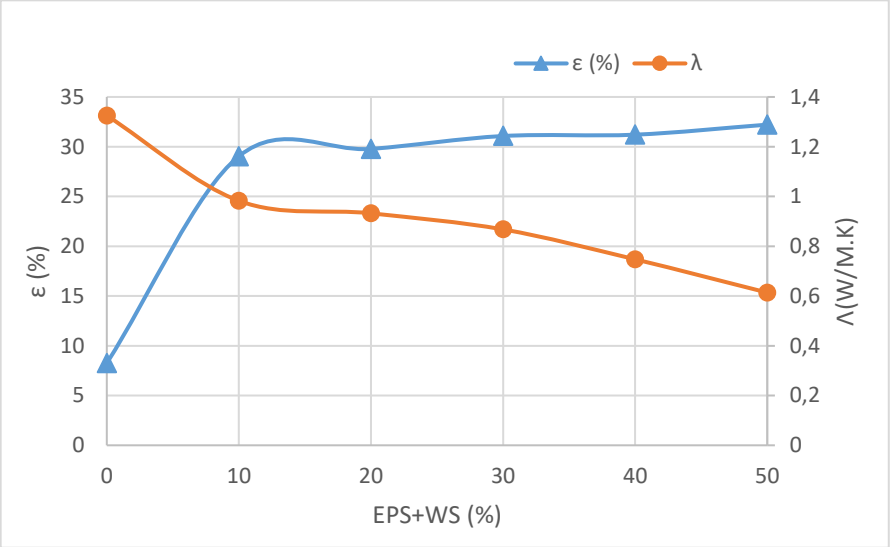


Figure 4-44 L'évolution de la porosité et de la conductivité thermique en fonction du pourcentage de EPS+WS

La Figure 4-45 montre une comparaison entre les résultats de la porosité pour les bétons EPS, WS et EPS+WS. En analysant ces données, on constate que la porosité pour le béton contenant uniquement du polystyrène expansé augmente rapidement jusqu'à 20% de EPS, puis se stabilise autour de 30%. Tandis que pour le béton de copeaux de bois, ce paramètre augmente de manière plus linéaire et reste inférieur par rapport aux autres béton atteignant environ 20% à 50% de WS.

Finalement, le béton de combinaison (EPS+WS) manifeste une augmentation rapide de la porosité jusqu'à 20% de substitution, puis une légère stabilisation autour de 30%. Cela implique que l'effet combiné des deux matériaux aboutit à une porosité plus élevée par rapport à chaque matériau pris individuellement.

On peut interpréter ces résultats comme suit, l'ajout de EPS conduit à une augmentation plus rapide de la porosité en raison de la nature légère et expansive du polystyrène [42], alors que les WS, bien qu'ils augmentent la porosité, ils le font à un rythme plus modéré, suggérant qu'ils remplissent plus efficacement les espaces sans créer autant de vides supplémentaires[238]. Ceci est en accord avec l'étude comparative entre le béton de EPS et le béton de WS menée par Ziregue [243] qui conclut que l'augmentation de la porosité est plus prononcée pour les bétons de EPS que pour les bétons de WS en raison de la grande porosité des granulats de polystyrène par rapport à celle des granulats de bois.

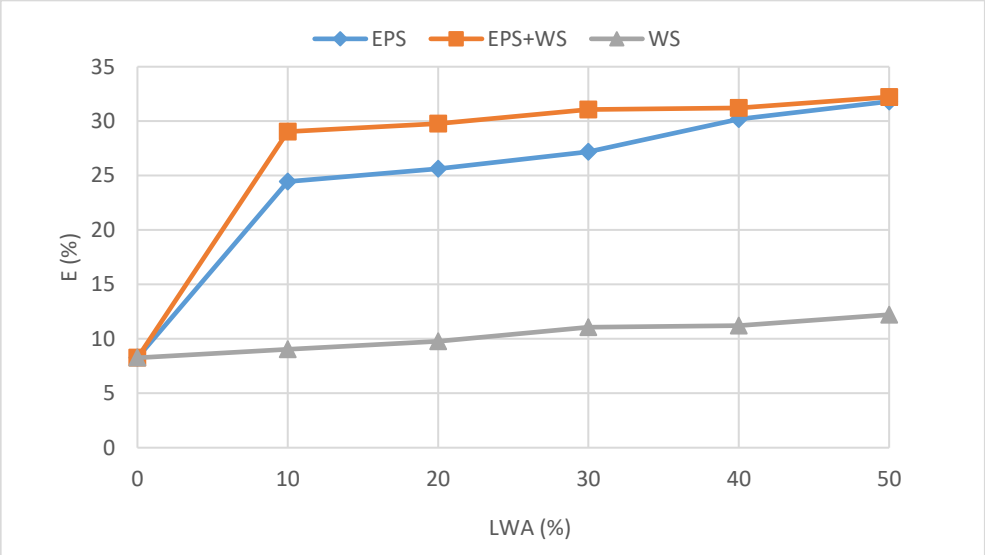


Figure 4-45 Comparaison de la porosité des béton EPS, WS, et EPS+WS

4.4.6. Résistance au feu

- **Résistance à la compression**

La Figure 4-46 montre la résistance à la compression après exposition au feu pour le béton de EPS+WS. Il est clair que la résistance à la compression diminue pour toutes les températures avec l'augmentation de la proportion de EPS+WS.

- À température ambiante (20°C), la résistance à la compression diminue progressivement avec l'augmentation du pourcentage de EPS+WS, ce qui est attendu en raison de la faible résistance intrinsèque des granulats légers comparés aux granulats traditionnels.
- À 80°C et 100°C, la résistance diminue rapidement jusqu'à environ 15 % de EPS+WS, puis la diminution devient moins marquée. Cela suggère que les températures modérées entraînent une dégradation initiale importante des composants organiques, suivie d'un

ralentissement de la perte de résistance, probablement dû à l'élimination des éléments les plus sensibles à la chaleur et à une restructuration partielle du matériau. À ces températures, la dégradation thermique commence à affecter les composants organiques mais ne les détruit pas complètement. La perte de résistance est notable mais moins sévère.

- À 200°C et 400°C, la résistance à la compression diminue drastiquement, surtout au-delà de 20 %.de LWA. Les températures élevées accélèrent la dégradation thermique des composants organiques et polymériques, entraînant une perte substantielle de la résistance mécanique. À 200°C, la dégradation thermique devient plus prononcée. Les polymères (EPS) commencent à fondre et les fibres de bois à se carboniser, entraînant une perte significative de la cohésion structurelle. À 400°C, la dégradation est maximale. Les matériaux organiques sont presque entièrement détruits, ce qui se traduit par une perte de résistance à la compression très importante, tombant à environ 5 MPa à 50 % de EPS+WS. Ce qui est confirmé par les résultats trouvés par Sayadi et al. [132].

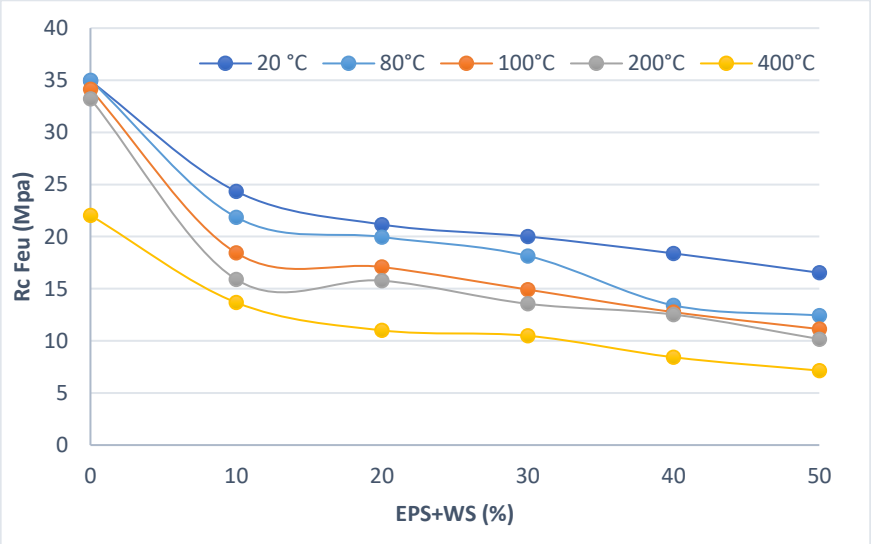


Figure 4-46 Résistance à la compression après exposition à différentes températures

- **Résistance à la flexion**

La Figure 4-47, résume les résultats de la résistance à la flexion après exposition au feu pour le béton de EPS+WS. Visiblement, la résistance à la flexion suit une tendance similaire à celle de la résistance à la compression, diminuant avec l'augmentation de la proportion de EPS+WS pour toutes les températures, mais, la diminution est plus prononcée pour les températures plus élevées (200°C et 400°C). Ainsi, la résistance à la flexion est affectée différemment selon les différentes températures.

- À température ambiante (20°C), la résistance en flexion diminue avec l'augmentation du pourcentage de EPS+WS, ce qui est attendu étant donné la nature des granulats légers (EPS et WS), qui réduisent la cohésion et la rigidité du matériau.
- À 80°C et 100°C : La résistance à la flexion diminue rapidement jusqu'à environ 15 % de EPS+WS, puis la diminution ralentit. Cela suggère une dégradation initiale importante des liaisons entre les composants de la matrice de béton.
- À 200°C : La résistance à la flexion diminue drastiquement, indiquant que la cohésion des matériaux commence à se rompre de manière plus significative. Les polymères se décomposent et les fibres de bois perdent leur intégrité structurelle.
- À 400°C, la résistance à la flexion est presque entièrement perdue, tombant à environ 2 MPa à 50 % de EPS+WS. La dégradation thermique maximale entraîne une perte presque complète de la capacité de flexion. Des résultats similaires sont rapporté par Herihiri [42].

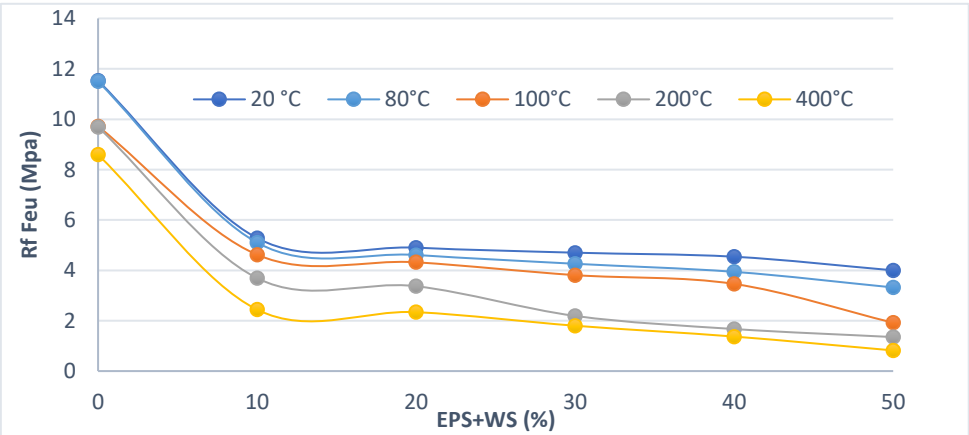


Figure 4-47 Résistance à la flexion après exposition à différentes températures

La Figure 4-48 montre des images MEB d'un échantillon de béton contenant EPS+WS après exposition à 400°C. on peut remarquer des fissures et des dégradations dans la microstructure du béton, cela est dû à la décomposition thermique des matériaux organiques (WS) et à l'expansion thermique différentielle entre les composants du béton [162]. D'une part, le polystyrène étant un polymère, fonds et se décompose à ces températures, créant des vides supplémentaires et affaiblissant la structure du béton [231].

Donc, après exposition à de hautes températures, des transformations de phases dans la matrice cimentaire peuvent se produire, affectant la cohésion et la résistance mécanique du béton. Les images montrent probablement des signes de dégradation de la matrice cimentaire, comme la formation de nouvelles phases ou la décomposition des phases existantes. Par ailleurs, les microfissures visibles dans les images peuvent être attribuées au stress thermique induit par l'exposition à haute température. Ces fissures augmentent la porosité globale et compromettent l'intégrité structurelle du béton. Aussi, la distribution et la taille des pores semblent être affectées par la présence de EPS et WS comme montré sur les images [162, 233].

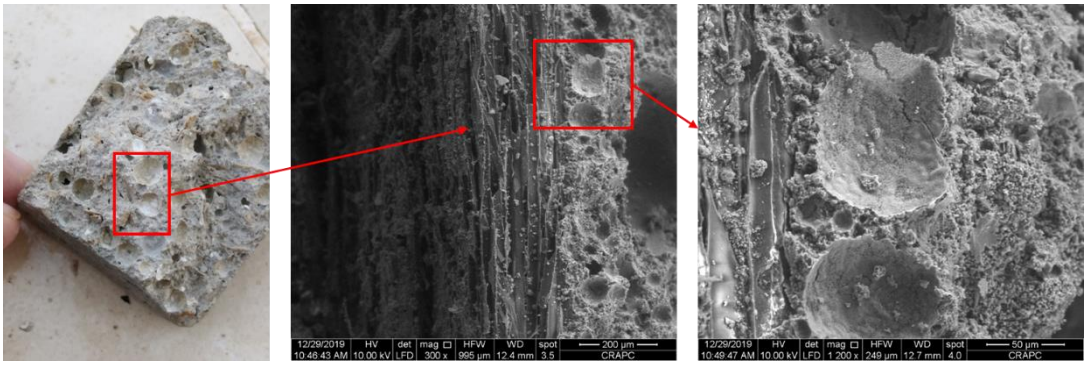


Figure 4-48 Images MEB d'un échantillon de béton contenant EPS+WS après exposition à 400°C

4.4.7. Microstructure

L'image photographique et MEB (Figure 4-49) montrent clairement la distribution des granulats légers (EPS+WS) dans la matrice du béton. On observe des vides et des pores dans la matrice et autour des billes de EPS et des copeaux de bois, confirmant l'augmentation de la porosité observée dans les mesures macroscopiques précédentes [74, 162]. Les fibres de bois et les billes de polystyrène traitées semblent bien intégrés dans la matrice, avec des ponts visibles entre les fissures potentielles, suggérant une contribution positive à la ductilité et à la résistance à la fissuration du béton. Semblable constatation est rapportée par Fu et al. [244] qui ont trouvé que la liaison entre les copeaux de bois et le mortier était moins compacte que celle entre les granulats et le mortier. De plus, l'interaction entre EPS et WS

contribue à créer une structure poreuse efficace pour l'isolation thermique, tout en maintenant une certaine intégrité mécanique.

Ces résultats révèlent que les bétons légers contenant EPS et WS peuvent être particulièrement utiles dans les applications où l'isolation thermique et une résistance mécanique modérée sont requises, comme dans les constructions de bâtiments économes en énergie.

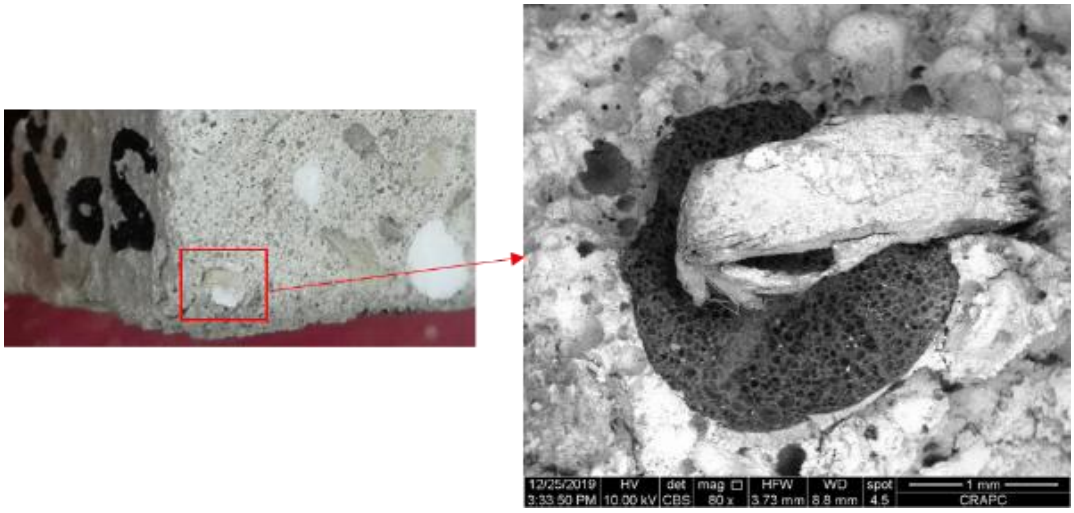


Figure 4-49 La distribution des granulats légers (EPS+WS) dans la matrice du béton

4.4.8. Impact du traitement du polystyrène expansé et des copeaux de bois

Afin d'évaluer l'effet du traitement appliqué à l'EPS et aux WS, une étude comparative a été réalisée entre les résultats obtenus pour ces matériaux traités et les données de la littérature concernant les matériaux non traités (Tableau 4-2)

Tableau 4-2 Comparaison des propriétés des bétons légers (EPS et WS) traités et non traités avec les résultats de la littérature

Propriété	Méthode de substitution	Densité (kg/m³)	Rc (MPa)	Rf (MPa)	Conductivité thermique (W/m·K)	Porosité (%)
Béton EPS non traité [245]	Remplacement partiel du sable (10-60 % vol.)	600 - 1600	08-20	2.0 - 4.0	0.03 - 0.15	25 - 40
Béton WS non traité [246]	Remplacement partiel des granulats fins (10-45 % vol.)	700 - 1500	03-08	1.5 - 3.5	0.05 - 0.20	20 - 35
Béton alternatif non traité [247]	Remplacement partiel des granulats fins (15-50 % vol.)	900 - 1700	05-18	2.0 - 4.5	0.04 - 0.18	22 - 38
Béton EPS non traité [223]	Remplacement partiel du sable (5-40 % vol.)	650 - 1550	06-22	2.5 - 4.2	0.03 - 0.14	27 - 45
Béton WS non traité [248]	Remplacement partiel des granulats fins (10-55 % vol.)	550 - 1400	02-06	1.2 - 3.0	0.06 - 0.22	18 - 37
Béton EPS non traité [249]	Remplacement partiel du sable et granulats avec déchets plastiques (45% vol.)	1200 - 1500	15 - 22	2.5 - 4.5	0.28 - 0.44	22 - 30
Béton EPS traité(Benchouaf)	**Remplacement partiel du sable (10-50 % vol.)**	**1600 - 1750**	**15 - 22**	**3.0 - 4.5**	**0.18 - 0.25**	**22 - 24**
Ton béton WS traité(Benchouaf)	**Remplacement partiel du sable (10-50 % vol.)**	**1700 - 1900**	**18 - 24**	**3.8 - 5.5**	**0.22 - 0.28**	**20 - 23**
Ton béton EPS+WS traité(Benchouaf)	**Remplacement partiel du sable (10-50 % vol.)**	**1800 - 2000**	**25 - 30**	**4.2 - 6.0**	**0.25 - 0.30**	**21 - 25**

Les résultats obtenus pour les bétons traités montrent une nette amélioration des performances mécaniques et thermiques par rapport aux formulations non traitées issues de la littérature. En

effet, la résistance à la compression du béton EPS+WS traité atteint 25-30 MPa, surpassant ainsi les alternatives non traitées qui oscillent entre 15 et 22 MPa. De plus, la conductivité thermique demeure compétitive, offrant un compromis efficace entre isolation thermique et résistance structurelle. Toutefois, la densité des bétons traités est légèrement plus élevée, ce qui peut influencer leur légèreté comparée aux bétons intégrant une plus grande proportion de déchets. Ces résultats suggèrent que l'optimisation du traitement appliqué aux matériaux recyclés permet d'améliorer significativement les propriétés des bétons allégés, renforçant leur potentiel pour des applications structurelles et isolantes durables.

4.4.9. Conclusions

Ce chapitre a permis d'examiner en profondeur les effets de l'incorporation des copeaux de bois, du polystyrène expansé et du mélange de ces deux déchets dans le béton de sable. L'effet du traitement de ces matériaux a été définis. Les résultats obtenus, mettent en évidence les propriétés à l'état frais à savoir la maniabilité et à l'état durcis tels que la densité, la résistance mécanique, la conductivité thermique, la porosité, la résistance au feu et la microstructure des mélanges. Compte tenu de ce qui précède, il a été montré que :

- Le traitement de l'EPS, par une fine couche d'acrylique, améliore significativement les propriétés microstructurales et mécaniques du béton. Les analyses microstructurales montrent une meilleure intégration et adhésion de l'EPS traité dans la matrice cimentaire, une réduction de la porosité et une amélioration de la résistance thermique, ce qui conduit à un béton de meilleure qualité et plus durable.
- Les images MEB des échantillons de béton contenant de l'EPS traité révèlent une distribution non uniforme des billes d'EPS, caractérisée par des variations de répartition dans la matrice cimentaire.
- Les études comparatives de la microstructure entre le béton contenant de l'EPS non traité et traité par une couche d'acrylique démontrent clairement l'amélioration de la densité, de l'adhésion et de la résistance aux contraintes thermiques.
- Le mélange EPS+WS présente une densité intermédiaire, combinant les effets de réduction de poids du polystyrène et des copeaux de bois. Le polystyrène, ayant une plus faible densité, contribue à une réduction notable du poids, tandis que les copeaux de bois augmentent la porosité, réduisant ainsi la densité globale.
- Le béton EPS+WS offre des résistances intermédiaires entre celles obtenues avec les EPS seuls et les WS seuls. La mauvaise distribution du polystyrène en raison des charges électrostatiques et l'augmentation de la porosité due aux copeaux de bois expliquent cette tendance. Les WS contribuent davantage à la résistance globale, avec des valeurs proches de celles obtenues avec les WS seuls.
- La résistance à la flexion du béton EPS est inférieure à celle du béton témoin et des autres mélanges, en raison de la faible résistance mécanique du polystyrène et de sa mauvaise distribution. En revanche, le béton contenant des WS manifeste les meilleures performances mécaniques, attribuées à la ductilité et à la capacité des fibres de bois à absorber et distribuer les contraintes, favorisant le pontage des fissures.

- La résistance à la compression diminue de manière significative après 10 %, mais reste relativement acceptable jusqu'à 30 %Le béton EPS+WS montre les valeurs de conductivité thermique les plus faibles, indiquant une amélioration significative des propriétés isolantes. Le polystyrène, avec sa faible conductivité thermique, joue un rôle crucial dans cette réduction, surpassant l'effet des copeaux de bois.
- La conductivité thermique diminue avec l'augmentation du pourcentage de LWA (EPS + bois), ce qui est favorable pour des applications d'isolation thermique.
- Le béton combiné EPS+WS manifeste une augmentation rapide de la porosité jusqu'à 20% de substitution, puis une légère stabilisation. L'ajout de EPS conduit à une augmentation rapide de la porosité, tandis que les WS remplissent plus efficacement les espaces, créant moins de vides supplémentaires.
- La résistance au feu suit une tendance similaire à celle de la résistance à la compression, diminuant avec l'augmentation de la proportion de EPS+WS, surtout à des températures plus élevées (200°C et 400°C).
- La résistance au feu pour le béton EPS+WS, diminue avec l'augmentation des températures, mais les valeurs restent plus stables pour les compositions inférieures à 10%-20%.
- En conclusion, la composition optimale selon la norme NF EN 206-1 et des performances est :
- **Pour une application structurelle** : les pourcentages de 10 % à 20 % d'EPS + bois semblent optimaux. Ces compositions permettent de conserver une résistance à la compression satisfaisante (~25-30 MPa), tout en réduisant la densité (D1.8 à D2.0) et en améliorant les propriétés isolantes. De plus, la porosité reste dans une plage stable, garantissant un bon équilibre entre légèreté et performance mécanique
- **Pour une application d'isolation thermique** : Les pourcentages de 40%-50% d'EPS + bois offrent une très faible conductivité thermique (~0,3-0,4 W/m.K) et une légèreté maximale (D1.6), mais leur faible résistance mécanique limite leur usage structurel.

CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS

La présente thèse a exploré l'élaboration d'un matériau de construction innovant et allégé à base de polystyrène granulé et de copeaux de bois. Le but de cette recherche était de concevoir un composite qui allie légèreté, performances mécaniques adéquates et durabilité, tout en exploitant des matériaux recyclés et respectueux de l'environnement. Les principaux travaux réalisés et les résultats obtenus sont les suivants :

Les propriétés physiques et chimiques du polystyrène granulé et des copeaux de bois ont été minutieusement analysées. Il a été observé que le polystyrène granulé possède d'excellentes propriétés d'isolation thermique et acoustique, tandis que les copeaux de bois contribuent à la légèreté et à la rigidité du composite.

Divers mélanges de polystyrène granulé et de copeaux de bois ont été testés pour déterminer les proportions optimales. Les essais expérimentaux ont montré que l'incorporation de 30% de polystyrène et 20% de copeaux de bois dans une matrice cimentaire offre un bon équilibre entre légèreté et résistance mécanique.

Les tests de résistance à la compression, de flexion et de traction ont démontré que le composite développé répond aux normes de construction pour diverses applications. De plus, des essais de durabilité ont confirmé une bonne résistance au feu et une stabilité dimensionnelle adéquate dans des conditions variées d'humidité et de température.

Des applications pilotes ont été menées pour valider la faisabilité du matériau dans des conditions réelles. Les résultats obtenus ont confirmé l'efficacité du composite dans des projets de construction résidentielle et commerciale, en offrant des économies de coût et de temps de mise en œuvre.

Cette thèse a apporté plusieurs contributions significatives au domaine des matériaux de construction durables :

- Innovation Matérielle : Le développement d'un nouveau matériau composite léger à base de polystyrène granulé et de copeaux de bois représente une avancée notable, offrant des alternatives viables aux matériaux traditionnels.
- Valorisation des Déchets : En intégrant des sous-produits industriels, cette recherche contribue à une économie circulaire et à la réduction des déchets.

- Performances Améliorées** : Le composite développé combine légèreté, isolation thermique et acoustique, et résistance mécanique, répondant ainsi à plusieurs exigences du secteur de la construction moderne.
- Impact Environnemental Réduit : L'utilisation de matériaux recyclés et l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments construits avec ce composite contribuent à réduire l'empreinte carbone du secteur. Une meilleure isolation thermique signifie une consommation énergétique moindre, réduisant ainsi les émissions de CO_2 liées au chauffage et à la climatisation des bâtiments.

Malgré les résultats prometteurs obtenus, certaines limites méritent d'être mentionnées :

- Variabilité des Matériaux Recyclés : Les propriétés des copeaux de bois et du polystyrène granulé peuvent varier selon leur source, nécessitant une standardisation des processus de production.
- Évaluation à Long Terme : Des études de durabilité à long terme sont nécessaires pour confirmer la performance du matériau sur plusieurs décennies.
- Échelle Industrielle : La transition de la production à petite échelle à la production industrielle nécessite des ajustements et des investissements supplémentaires.

Pour les recherches futures, plusieurs pistes sont envisagées :

- Optimisation des Propriétés Mécaniques : Explorer l'ajout d'autres adjuvants ou renforts pour améliorer davantage les propriétés mécaniques du composite.
- Applications Diversifiées : Tester le matériau dans des applications variées, telles que les infrastructures routières ou les constructions modulaires.
- Analyse de Cycle de Vie : Réaliser une analyse approfondie du cycle de vie pour évaluer l'impact environnemental complet du matériau, de la production à la fin de vie.

En conclusion, cette thèse a démontré le potentiel d’un matériau de construction innovant et allégé, combinant polystyrène granulé et copeaux de bois, pour répondre aux exigences de durabilité, de performance et d'efficacité énergétique dans le secteur de la construction. Les résultats obtenus ouvrent de nouvelles perspectives pour le développement de matériaux respectueux de l'environnement, alignés avec les objectifs globaux de limitation d’utilisation des matériaux locaux (sable) et la valorisation des ressources recyclées. La poursuite de cette

recherche et son application à plus grande échelle pourraient significativement transformer les pratiques de construction et contribuer à un avenir plus durable.

Références

1. Bouziani, T., M. Bederina, and M. Hadjoudja, *Effect of dune sand on the properties of flowing sand-concrete (FSC).* International Journal of Concrete Structures and Materials, 2012. **6**(1): p. 59-64.
2. Benamara, D., L. Zeghichi, and B. Mezghiche. *BÉTON DE SABLE HAUTE PERFORMANCE: FORMULATION, PROPRIÉTÉS PHYSICO-MÉCANIQUES ET DURABILITÉ/HIGH PERFORMANCE SAND CONCRETE: FORMULATION, PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES AND DURABILITY*. in *Annales du Bâtiment et des Travaux Publics*. 2015. Editions ESKA.
3. CAULLIER, A. and C. MARMOTTAN, *LE PROJET NATIONAL SABLOCRETE-RECHERCHE SUR LES BETONS DE SABLE.* Revue générale des routes et des aérodromes, 1990(680).
4. https://fr.wikipedia.org/wiki/Phare_de_Port-Sa%C3%AFd. *Phare de Port-Saïd*.
5. Chauvin, J., *le béton de sable en union soviétique.* Bull. LCPC, 1991(174): p. 61-69.
6. Benaissa, A., P. Morlier, and V. Tram, *Le béton de sable un matériau non fissurant.* Revue Algérie Equipement, 1992. **66**: p. 7-11.
7. IRASTORZA-BARBET, D., *UTILISATION DE BETON DE SABLE EN CONSTRUCTION ROUTIERE-LA CHAUSSEE SABLOCRETE.* Revue générale des routes et des aérodromes, 1992(702).
8. Benaissa, I., *béton de sable fibré projeté pour panneau 3d*. 2015, Université de Cergy Pontoise; Université des Sciences et de la Technologie d ….
9. Chauvin, J., *Béton de sable en Union Soviétique.* Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées (LCPC), 1991. **174**: p. 61-69.
10. BEGHIN, B., *polystyrène expansé.* Techniques de l'ingénieur. Plastiques et composites, 1995. **2**(A3341): p. A3341. 1-A3341. 7.
11. Bouziani, T., *Formulation et caractérisation d'un béton de sable fibré auto-plaçant*. 2013, Université de Boumerdès-M'hamed Bougara.
12. Tayeb, B., et al., *Effect of marble powder on the properties of self-compacting sand concrete.* 2011.
13. Benaissa, A., et al., *Panneau 3D au béton de sable.* Materials and structures, 2008. **41**: p. 1377-1391.
14. Khelaifa, H. and Z. Boudaoud, *Etude de l'effet de l'ajout de granulats de caoutchouc (issus de déchets) sur le comportement des bétons de sable (de dunes) autoplaçant et compactés.* 2021.
15. Khelaifa, H., Z. Boudaoud, and A. Benouis, *Effect of adding rubber aggregates on the behaviour of compacted sand concrete.* Innovative Infrastructure Solutions, 2021. **6**: p. 1-11.
16. Afnor, *NF P98-170*, in *Chaussées en béton de ciment - Exécution et contrôle*. 2018.
17. GADRI, K., *Etude Expérimentale Sur La Compatibilité Déformationnelle Des Réparations En Béton De Sable*. 2018, Université Mohamed Khider-Biskra.
18. Afnor, *NF P18-500*, in *Béton - Béton de sable*.
19. Dreux, G. and J. Festa, *Nouveau guide du béton et de ses constituants*. 1998: Eyrolles.
20. Chauvin, J.-J. and G. Grimaldi, *Les bétons de sable.* Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, 1988(157): p. 9-15.
21. Afnor, *NF P 18-301*, in *Granulats. Granulats naturels pour bétons hydrauliques*. 1993.
22. Afnor, *NF P 18-101*, in *Granulats - Vocabulaire - Définitions et classifications*. 1990.
23. Afnor, *NF P15-301*, in *Liants hydrauliques - Ciments courants - Composition, spécifications et critères de conformité.* 1994.
24. Chanvillard, G. and O. Basuyaux, *Une methode de formulation des betons de sable maniabilite et resistance fixees.* BULLETIN-LABORATOIRES DES PONTS ET CHAUSSEES, 1996: p. 49-64.
25. Ramachandran, V., *Alkali-aggregate expansion inhibiting admixtures.* Cement and Concrete Composites, 1998. **20**(2-3): p. 149-161.

26. Afnor, *NF P 18-303*, in *Béton - Mise en oeuvre - Eau de gâchage pour béton de construction*.
27. CNERIB, *Recommandations Pour la Production et Mise en œuvre du Béton de Terre Stabilisée*. 1993, CNERIB Algiers, Algeria.
28. De Larrard, F., *Structures granulaires et formulation des bétons.* 2000.
29. BEDERINA, M., *Caractérisation mécanique et physique des bétons de sables à base de Déchets de bois.* 2007.
30. BENMALEK, L. and R. DERBALA. *Elaboration et caractérisation d'un béton à base de sable dunaire et de sous-produits industriels*. in *Colloque" Sols et matériaux à problèmes*. 2016.
31. Moukete, E.E.A., *Formulation, microstructure, durabilité et comportement mécanique du béton à base de sable de carrière combiné au sable alluvionnaire*. 2021, CY Cergy Paris Université; Université de Yaoundé I.
32. Bendrina, M., *Caractérisation mécanique et microstructure des bétons de sables locaux*. 2000.
33. Zhang, G., et al., *Performance of mortar and concrete made with a fine aggregate of desert sand.* Building and Environment, 2006. **41**(11): p. 1478-1481.
34. Ahmed-Chaouch, A., *Etude des caractéristiques du béton de sable de dunes*. 1993, Ecole Nationale Polytechnique.
35. Benmalek, M. and A. Bali. *Le béton de sable de dunes: un matériau performant pour le monde arabe*. in *Proceedings of first arab mechanical congress. Damas, Syrie*. 1997.
36. Bédérina, M., et al., *Reuse of local sand: effect of limestone filler proportion on the rheological and mechanical properties of different sand concretes.* Cement and concrete research, 2005. **35**(6): p. 1172-1179.
37. Tsivilis, S., et al., *Properties and behavior of limestone cement concrete and mortar.* Cement and concrete research, 2000. **30**(10): p. 1679-1683.
38. Coquillat, G., *Béton de sable à haute performance.* Centre Expérimental de Recherches et d'Etudes du BTP (CEBTP), Rapport de recherche. Bordeaux, 1992.
39. ACKER, P., et al., *Caractères du béton.* Techniques de l'ingénieur. Construction, 1986. **3**(C2240): p. C2240. 1-C2240. 22.
40. Statistics, I., *Key world energy statistics.* International Energy Agency: Paris, France, 2014.
41. MINES, M.D.L.É.E.D., *Bilan énergétique national*. 2022.
42. HERIHIRI, O., *ETUDE DES PROPRIETES MECANIQUES, THERMIQUES ET ACOUSTIQUES DES BETONS DE GRANULATS LEGERS*. 2022, Université Mohamed Khider Biskra.
43. BURCKEL, T., et al., *Apport des BFUP dans le traitement des ponts thermiques.*
44. AGENCE, D.L.E.E.D., *LA MAITRISE DE L'ENERGIE (ADEME).(2010).* Aujourd'hui, on peut agir chacun à son niveau. Repéré le. **10**(12): p. 11.
45. Ngo, T., et al., *Characterisation tests and design of foam concrete for prefabricated modular construction.* Concrete in Australia, 2017. **43**(3): p. 43-50.
46. Hajimohammadi, A., T. Ngo, and P. Mendis, *How does aluminium foaming agent impact the geopolymer formation mechanism?* Cement and Concrete Composites, 2017. **80**: p. 277-286.
47. Mohamad, A., et al., *Influence of Porous Structure of Non-Autoclaved Bio-Based Foamed Concrete on Mechanical Strength.* Buildings, 2023. **13**(9): p. 2261.
48. Nguyen, T., et al., *3D meso-scale modelling of foamed concrete based on X-ray Computed Tomography.* Construction and Building Materials, 2018. **188**: p. 583-598.
49. Lamprecht, H.-O., *Opus caementitium: Bautechnik der Römer.* (No Title), 1985.
50. Chandra, S. and L. Berntsson, *Lightweight aggregate concrete*. 2002: Elsevier.
51. Clay, E.E.S., *Slate Institute. Lightweight Concrete: History, Applications.* Economics. Washington, DC: ESCSI, 1971.
52. Narayanan, N. and K. Ramamurthy, *Structure and properties of aerated concrete: a review.* Cement and Concrete composites, 2000. **22**(5): p. 321-329.
53. Concrete, A., *Guide for Structural Lightweight.* 1987.
54. Ke, Y., et al., *Influence of volume fraction and characteristics of lightweight aggregates on the mechanical properties of concrete.* Construction and Building Materials, 2009. **23**(8): p. 2821-2828.

55. Dinelli, G., et al., *Experimental investigation on the use of fly ash for lightweight precast structural elements.* Materials and Structures, 1996. **29**: p. 632-638.
56. Akers, D.J., et al., *Guide for structural lightweight-aggregate concrete.* ACI 213R-03. American Concrete Institute (ACI), Michigan, 2003.
57. Real, S., et al., *Contribution of structural lightweight aggregate concrete to the reduction of thermal bridging effect in buildings.* Construction and Building Materials, 2016. **121**: p. 460-470.
58. Roberz, F., et al., *Ultra-lightweight concrete: Energy and comfort performance evaluation in relation to buildings with low and high thermal mass.* Energy and Buildings, 2017. **138**: p. 432-442.
59. AFNOR, *NF EN 13055*, in *Granulats légers*. 2016.
60. ASTM, *ASTMC330-C330M*, in *Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete*. 2023.
61. Conshohocken, A.W., *ASTM C331M-17*, in *Standard Specification for Lightweight Aggregates for Concrete Masonry Units*. 2017.
62. ASTM, *ASTM C332-17* in *Standard Specification for Lightweight Aggregates for Insulating Concrete*. 2023.
63. Sveindottir, E., et al., *LWAC Material Properties-State-of-the-Art.* Brite Euram Proj. Euro Lightcon, 1998. **111**.
64. Sveindottir, E., et al., *Light Weight Aggregates-Datasheets.* Brite Euram Proj. Euro Lightcon, 1997. **132**.
65. Pauw, A. *Structural lightweight aggregate concrete (concrete technology, structural design)*. in *Proceedings of the 8th IABSE congress, New York, NY, USA*. 1968.
66. Arnould, M., et al., *Granulats et bétons légers*. 1986.
67. EN, B.S., *206-1 Concrete-Part 1: Specification, performance, production and conformity.* British Standards Institution, 2000.
68. AFNOR, *NF EN 1992-1-1*, in *Calcul des structures en béton - Partie 1-1 : règles générales et règles pour les bâtiments*. 2005.
69. Thienel, K. *Application of Lightweight Concrete*. in *Nordic Mini-Seminar: Structural Lightweight Aggregate Concrete; Øverli, JA, Zivkovic, J., Eds*. 2019.
70. Newman, J., *2 Properties of structural lightweight aggregate*, in *Structural lightweight aggregate concrete*. 1993, CRC Press: Taylor & Francis Group. p. 19.
71. Européen, C., *Eurocode 2: Design of concrete structures—part 1-1: General rules and rules for buildings.* London: British Standard Institution, 2004.
72. Schlaich, M., B. Hillemeier, and K. Schubert. *Infraleichtbeton–Potenzial für den Sichtbetonbau*. in *Proceedings*. 2007.
73. Donners, M., et al., *Warmbeton.*
74. Bicer, A. and F. Kar, *The effects of apricot resin addition to the light weight concrete with expanded polystyrene.* Journal of Adhesion Science and technology, 2017. **31**(21): p. 2335-2348.
75. Jo, B.-w., S.-k. Park, and J.-b. Park, *Properties of concrete made with alkali-activated fly ash lightweight aggregate (AFLA).* Cement and Concrete composites, 2007. **29**(2): p. 128-135.
76. Oreshkin, D., V. Semenov, and T. Rozovskaya, *Properties of light-weight extruded concrete with hollow glass microspheres.* Procedia Engineering, 2016. **153**: p. 638-643.
77. Liu, X., K.S. Chia, and M.-H. Zhang, *Development of lightweight concrete with high resistance to water and chloride-ion penetration.* Cement and Concrete Composites, 2010. **32**(10): p. 757-766.
78. Bahsandy, A.A., F.M. Eid, and E.H. Abdou, *Lightweight concrete cast using Recycled aggregates.* Int. J. Constr. Eng. Manag, 2017. **6**(2): p. 35-45.
79. Colangelo, F. and I. Farina, *Lightweight concrete with polyolefins as aggregates*, in *Use of Recycled Plastics in Eco-efficient Concrete*. 2019, Elsevier. p. 167-187.

80. Ni, F.M.-W., A.G. Oyeyi, and S. Tighe, *The potential use of lightweight cellular concrete in pavement application: a review.* International Journal of Pavement Research and Technology, 2020. **13**: p. 686-696.
81. Sari, K.A.M. and A.R.M. Sani. *Applications of foamed lightweight concrete*. in *MATEC Web of Conferences*. 2017. EDP Sciences.
82. Agarwal, S. and R.K. Gupta, *Plastics in buildings and construction*, in *Applied plastics engineering handbook*. 2017, Elsevier. p. 635-649.
83. Chindaprasirt, P., et al., *Properties of wood flour/expanded polystyrene waste composites modified with diammonium phosphate flame retardant.* Polymer Composites, 2015. **36**(4): p. 604-612.
84. Agrawal, Y., et al., *A comprehensive review on the performance of structural lightweight aggregate concrete for sustainable construction.* Construction Materials, 2021. **1**(1): p. 39-62.
85. Zareef, M.A.M.E., *Conceptual and structural design of buildings made of lightweight and infra-lightweight concrete.* 2010.
86. Kurpinska, M., B. Grzyl, and A. Kristowski, *Cost analysis of prefabricated elements of the ordinary and lightweight concrete walls in residential construction.* Materials, 2019. **12**(21): p. 3629.
87. Held, M., *Hochfester Konstruktions-Leichtbeton. beton Heft 7*. 1996, S.
88. Taylor, H.F., *Cement chemistry*. Vol. 2. 1997: Thomas Telford London.
89. Demirboğa, R. and R. Gül, *Thermal conductivity and compressive strength of expanded perlite aggregate concrete with mineral admixtures.* Energy and Buildings, 2003. **35**(11): p. 1155-1159.
90. Chung, S.-Y., M. Abd Elrahman, and D. Stephan, *Effect of different gradings of lightweight aggregates on the properties of concrete.* Applied Sciences, 2017. **7**(6): p. 585.
91. Shafigh, P., et al., *Engineering properties of lightweight aggregate concrete containing limestone powder and high volume fly ash.* Journal of Cleaner Production, 2016. **135**: p. 148-157.
92. Abd Elrahman, M., S.-Y. Chung, and D. Stephan, *Effect of different expanded aggregates on the properties of lightweight concrete.* Magazine of Concrete Research, 2019. **71**(2): p. 95-107.
93. AFNOR, *NF EN 1008*, in *Eau de gâchage pour bétons - Spécifications d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton*. 2003.
94. ACI, *ACI PRC-304-00*, in *Guide for Measuring, Mixing, Transporting, and Placing Concrete*. 2009.
95. Thienel, K., *Besonderheiten bei Leichtbeton in DIN FB 100.* Heft 526 Erläuterungen zu den Normen DIN EN 206-1, DIN 1045-2, DIN EN 13670, DIN 1045-3, DIN 1045-4 und DIN EN, 2011. **12620**: p. 80-84.
96. AFNOR, *DIN/TS 18004*, in *Usages des produits de construction dans les ouvrages de construction - Méthodes d'essai pour granulats pour béton selon DIN 1045-2*. 2022.
97. AFNOR, *NF EN 1097-6*, in *Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 6 : détermination de la masse volumique et du coefficient d'absorption d'eau*. 2022.
98. Du, Y., et al., *Experimental study on the dynamic behaviour of expanded-shale lightweight concrete at high strain rate.* Materials and Structures, 2022. **55**: p. 1-17.
99. Thienel, K.-C., T. Haller, and N. Beuntner, *Lightweight concrete—From basics to innovations.* Materials, 2020. **13**(5): p. 1120.
100. Lura, P., O.M. Jensen, and S.-I. Igarashi, *Experimental observation of internal water curing of concrete.* Materials and structures, 2007. **40**: p. 211-220.
101. SMEPLASS, S. *Moisture in light weight aggregates-practical consequences for the production properties of light weight aggregate concrete*. in *Second international symposium on structural lightweight aggregate concrete (Kristiansand, 18-22 June 2000)*. 2000.

102. Institute, A.C., *ACI 213R-14: Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete*. 2014, Farmington Hills.
103. John, M.J. and S. Thomas, *Bio fibers and bio composites. Carbohydrate polymers.* 2008.
104. Mehta, S., S. Biederman, and S. Shivkumar, *Thermal degradation of foamed polystyrene.* Journal of Materials Science, 1995. **30**: p. 2944-2949.
105. Almusawi, A.M., *Mise en œuvre et optimisation des propriétés d'une structure sandwich en matériaux biosourcés (fibres et bois de chanvre) avec une matrice en polystyrène expansé pour le bâtiment*. 2017, Université Bourgogne Franche-Comté.
106. Doroudiani, S. and H. Omidian, *Environmental, health and safety concerns of decorative mouldings made of expanded polystyrene in buildings.* Building and Environment, 2010. **45**(3): p. 647-654.
107. Troitzsch, J., W. Becker, and J. Haim, *International plastics flammability handbook: principles, regulations, testing, and approval.* (No Title), 1990.
108. Doroudiani, S. and M.T. Kortschot, *Polystyrene foams. I. Processing-structure relationships.* Journal of Applied Polymer Science, 2003. **90**(5): p. 1412-1420.
109. Doroudiani, S. and M.T. Kortschot, *Polystyrene foams. III. Structure–tensile properties relationships.* Journal of applied polymer science, 2003. **90**(5): p. 1427-1434.
110. Han, X., et al., *Continuous microcellular polystyrene foam extrusion with supercritical CO2.* Polymer Engineering & Science, 2002. **42**(11): p. 2094-2106.
111. Mihai, M., M.A. Huneault, and B.D. Favis, *Foaming of polystyrene/thermoplastic starch blends.* Journal of cellular plastics, 2007. **43**(3): p. 215-236.
112. Belal, F., R. Djelid, and O. HERIHIRI, *Etude de l'effet des ajouts minéraux sur les caractéristiques physico-mécanique et thermique du béton léger à base de polystyrène expansé.* 2018.
113. Ke, Y., *Caractérisation du comportement mécanique des bétons de granulats légers: expérience et modélisation*. 2008, Cergy-Pontoise.
114. Xu, Y., et al., *Experimental study and modeling on effective thermal conductivity of EPS lightweight concrete.* Journal of Thermal Science and Technology, 2016. **11**(2): p. JTST0023-JTST0023.
115. Yamura, K. and M. Yamauchi. *Use of polystyrene pieces for aggregate of concrete*. in *29. Proc. Annual conf. of Chugoku-Shikoku Branch of JSCE, Japan. Annexe A*. 1982.
116. AFNOR, *NF T56-104*, in *Matières alvéolaires à base de caoutchouc ou de matières plastiques - Détermination de la contrainte conventionnelle de poinçonnage des matériaux alvéolaires rigides*. 1978.
117. Panjehpour, M., A.A. Abang Ali, and Y.L. Voo, *Structural Insulated Panels: Past, Present, and Future.* Journal of Engineering, Project & Production Management, 2013. **3**(1).
118. Laukaitis, A., R. Žurauskas, and J. Kerien, *The effect of foam polystyrene granules on cement composite properties.* Cement and Concrete Composites, 2005. **27**(1): p. 41-47.
119. Choi, H.-J., J.-S. Kang, and J.-H. Huh, *A study on variation of thermal characteristics of insulation materials for buildings according to actual long-term annual aging variation.* International Journal of Thermophysics, 2018. **39**: p. 1-11.
120. Chen, B. and J. Liu, *Mechanical properties of polymer-modified concretes containing expanded polystyrene beads.* Construction and Building Materials, 2007. **21**(1): p. 7-11.
121. Nikbin, I.M. and M. Golshekan, *The effect of expanded polystyrene synthetic particles on the fracture parameters, brittleness and mechanical properties of concrete.* Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2018. **94**: p. 160-172.
122. Mohammed, H.J. and M. Zain, *Experimental application of EPS concrete in the new prototype design of the concrete barrier.* Construction and building materials, 2016. **124**: p. 312-342.
123. Miled, K., et al., *Compressive behavior of an idealized EPS lightweight concrete: size effects and failure mode.* Mechanics of materials, 2004. **36**(11): p. 1031-1046.

124. Miled, K., *Effet de taille dans le béton léger de polystyrène expansé.* THESE DE DOCTORAT DE L'ECOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSEES, SPECIALITE: MECANIQUE, STRUCTURE ET MATERIAUX, 2005.
125. Kuhail, Z. and S. Shihada, *Mechanical properties of polystyrene-lightweight concrete.* IUG Journal of Natural Studies, 2015. **11**(2).
126. Babu, K.G. and D.S. Babu, *Behaviour of lightweight expanded polystyrene concrete containing silica fume.* Cement and Concrete Research, 2003. **33**(5): p. 755-762.
127. Cadere, C.A., et al., *Engineering properties of concrete with polystyrene granules.* Procedia Manufacturing, 2018. **22**: p. 288-293.
128. Babu, D.S., K.G. Babu, and W. Tiong-Huan, *Effect of polystyrene aggregate size on strength and moisture migration characteristics of lightweight concrete.* Cement and Concrete Composites, 2006. **28**(6): p. 520-527.
129. Neville, A., *Brooks jj.* Concrete Technology, Person Education, England, 2004.
130. NEVILLE, A., *PROPERTIES OF CONCRETE*. 2011, AM Neville.
131. Herki, B., J. Khatib, and E. Negim, *Lightweight concrete made from waste polystyrene and fly ash.* World Applied Sciences Journal, 2013. **21**(9): p. 1356-1360.
132. Sayadi, A.A., et al., *Effects of expanded polystyrene (EPS) particles on fire resistance, thermal conductivity and compressive strength of foamed concrete.* Construction and building materials, 2016. **112**: p. 716-724.
133. Kan, A. and R. Demirboğa, *A new technique of processing for waste-expanded polystyrene foams as aggregates.* Journal of materials processing technology, 2009. **209**(6): p. 2994-3000.
134. Bogas, J.A. and A. Gomes, *Compressive behavior and failure modes of structural lightweight aggregate concrete–Characterization and strength prediction.* Materials & Design (1980-2015), 2013. **46**: p. 832-841.
135. Demirboga, R. and A. Kan, *Thermal conductivity and shrinkage properties of modified waste polystyrene aggregate concretes.* Construction and Building Materials, 2012. **35**: p. 730-734.
136. Demirel, B., *Optimization of the composite brick composed of expanded polystyrene and pumice blocks.* Construction and Building Materials, 2013. **40**: p. 306-313.
137. Khatib, J., B. Herki, and S. Kenai, *Capillarity of concrete incorporating waste foundry sand.* Construction and building materials, 2013. **47**: p. 867-871.
138. Herki, B.M., *Combined effects of densified polystyrene and unprocessed fly ash on concrete engineering properties.* Buildings, 2017. **7**(3): p. 77.
139. Saikia, N. and J. De Brito, *Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review.* Construction and Building Materials, 2012. **34**: p. 385-401.
140. Babu, K.G. and D.S. Babu, *Performance of fly ash concretes containing lightweight EPS aggregates.* Cement and concrete composites, 2004. **26**(6): p. 605-611.
141. Ferrándiz-Mas, V. and E. García-Alcocel, *Durability of expanded polystyrene mortars.* Construction and building materials, 2013. **46**: p. 175-182.
142. Wibowo, A.P., A.E. Lianasari, and T.A. Kurniawan, *The strength and water absorption of heated expanded polystyrene beads lightweight-concrete.* GEOMATE Journal, 2021. **21**(83): p. 150-156.
143. Major, M. and J. Halbiniak. *Effect of adhesion between eps granules and cement matrix on the characteristics of lightweight concretes*. in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. IOP Publishing.
144. Wibowo, A.P., M. Saidani, and M. Khorami. *Artificial Aggregate Made from Expanded Polystyrene Beads Coated with Cement Kiln Dust—An Experimental Trial*. in *Proceedings of the Second International Conference of Construction, Infrastructure, and Materials: ICCIM 2021, 26 July 2021, Jakarta, Indonesia*. 2022. Springer.
145. Prasittisopin, L., P. Termkhajornkit, and Y.H. Kim, *Review of concrete with expanded polystyrene (EPS): Performance and environmental aspects.* Journal of Cleaner Production, 2022. **366**: p. 132919.

146. Khatib, J., B. Herki, and A. Elkordi, *Characteristics of concrete containing EPS.* Use of recycled plastics in eco-efficient concrete, 2019: p. 137-165.
147. Liu, N. and B. Chen, *Experimental study of the influence of EPS particle size on the mechanical properties of EPS lightweight concrete.* Construction and Building Materials, 2014. **68**: p. 227-232.
148. Cui, C., et al., *Stress–strain relationship in axial compression for EPS concrete.* Construction and Building Materials, 2016. **105**: p. 377-383.
149. Fathi, M., A. Yousefipour, and E.H. Farokhy, *Mechanical and physical properties of expanded polystyrene structural concretes containing Micro-silica and Nano-silica.* Construction and Building Materials, 2017. **136**: p. 590-597.
150. Fernando, P., M. Jayasinghe, and C. Jayasinghe, *Structural feasibility of Expanded Polystyrene (EPS) based lightweight concrete sandwich wall panels.* Construction and building materials, 2017. **139**: p. 45-51.
151. Sandberg, D., et al., *Wood modification technologies: principles, sustainability, and the need for innovation*. 2021: CRC Press.
152. Besset, J., *Bois et matériaux dérivés.* Ed. Techniques de l'ingénieur, 1987.
153. Morsing, N., *Densification of Wood.: The influence of hygrothermal treatment on compression of beech perpendicular to gain.* 1998.
154. Chang, T.-C., et al., *Stabilizing effect of extractives on the photo-oxidation of Acacia confusa wood.* Polymer Degradation and Stability, 2010. **95**(9): p. 1518-1522.
155. Crawford, D.L. and R.L. Crawford, *Microbial degradation of lignocellulose: the lignin component.* Applied and environmental microbiology, 1976. **31**(5): p. 714-717.
156. Hatakeyama, H. and T. Hatakeyama, *Lignin structure, properties, and applications.* Biopolymers: lignin, proteins, bioactive nanocomposites, 2010: p. 1-63.
157. Cueff, G., *Développement d'un modèle thermomécanique du comportement sous agressions thermiques de matériaux cellulosiques: application à l'étude de résistance au feu de panneaux de bloc-porte en aggloméré de bois*. 2014, Université de Bordeaux.
158. Fakhreddine, M. *Consommation électrique : La Sonelgaz annonce un nouveau pic record de la consommation d'électricité* 2022; Available from: https://www.energymagazinedz.com/2022/08/16/consommation-electrique-la-sonelgaz-annonce-un-nouveau-pic-record-de-la-consommation-delectricite/.
159. Hartley, I. and M. Hamza, *Wood: Moisture Content, Hygroscopicity, and Sorption; Hashmi, S., Ed.; Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. 2016, Elsevier: Oxford, UK.
160. Cetiner, I. and A.D. Shea, *Wood waste as an alternative thermal insulation for buildings.* Energy and Buildings, 2018. **168**: p. 374-384.
161. Ismail, B., N. Belayachi, and D. Hoxha, *Hygric properties of wheat straw biocomposite containing natural additives intended for thermal insulation of buildings.* Construction and Building Materials, 2022. **317**: p. 126049.
162. Rabbat, C., et al., *Sustainability of biomass-based insulation materials in buildings: Current status in France, end-of-life projections and energy recovery potentials.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022. **156**: p. 111962.
163. Yadav, M. and M. Agarwal, *Biobased building materials for sustainable future: An overview.* Materials Today: Proceedings, 2021. **43**: p. 2895-2902.
164. Akkaoui, A., *Bétons de granulats de bois: Étude expérimentale et théorique des propriétés thermo-hydro-mécaniques par des approches multi-échelles*. 2014, Université Paris-Est.
165. Boustingorry, P., *Elaboration d'un matériau composite à matrice gypse et renfort bois fragmenté. Amélioration de la résistance au vissage de produits préfabriqués en gypse*. 2002, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne.
166. Bouguerra, A., et al., *Isothermal moisture properties of wood-cementitious composites.* Cement and concrete research, 1999. **29**(3): p. 339-347.

167. Zaknoune, A., *Etude du comportement thermohydrique de matériaux «chanvre-chaux» lors de la phase de séchage–estimation par technique inverse des propriétés hydriques*. 2011, Université de Bretagne Sud.
168. Bederina, M., et al., *Drying shrinkage studies of wood sand concrete–Effect of different wood treatments.* Construction and Building Materials, 2012. **36**: p. 1066-1075.
169. Nozahic, V., *Vers une nouvelle démarche de conception des bétons de végétaux lignocellulosiques basée sur la compréhension et l'amélioration de l'interface liant/végétal: application à des granulats de chenevotte et de tige de tournesol associés à un liant ponce/chaux*. 2012, Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II.
170. Toledo Filho, R.D., et al., *Free, restrained and drying shrinkage of cement mortar composites reinforced with vegetable fibres.* Cement and concrete composites, 2005. **27**(5): p. 537-546.
171. Beltran, M.S. and H. Schlangen. *Interface bond characteristics between wood fibres and a cement matrix*. in *Brittle maatrix composites 9*. 2009. IFTR and Woodland Publ.
172. Al-Mohamadawi, A., *Contribution à l'étude de l'impact de l'environnement vis-à-vis d'éco-matériaux lignocellulosiques*. 2016, Université de Picardie Jules Verne.
173. Pham, T.H., et al., *Etude expérimentale et numérique de la conductivité thermique d'un composite chaux–chanvre.* XXXe Rencontres AUGC-IBPSA Chambéry, Savoie, 2012. **6**.
174. Evrard, A., *Transient hygrothermal behaviour of lime-hemp materials.* 2008.
175. Pacheco-Torgal, F. and S. Jalali, *Cementitious building materials reinforced with vegetable fibres: A review.* Construction and building materials, 2011. **25**(2): p. 575-581.
176. Mohr, B., H. Nanko, and K. Kurtis, *Durability of kraft pulp fiber–cement composites to wet/dry cycling.* Cement and Concrete Composites, 2005. **27**(4): p. 435-448.
177. Gram, H.-E., *Durability of natural fibres in concrete.* 1984.
178. Sivaraja, M., et al., *Study on durability of natural fibre concrete composites using mechanical strength and microstructural properties.* Bulletin of Materials Science, 2010. **33**: p. 719-729.
179. Toledo Filho, R.D., et al., *Durability of compression molded sisal fiber reinforced mortar laminates.* Construction and building materials, 2009. **23**(6): p. 2409-2420.
180. Lima, H.C., et al., *Durability analysis of bamboo as concrete reinforcement.* Materials and Structures, 2008. **41**: p. 981-989.
181. Khazma, M., et al., *Coating of a lignocellulosic aggregate with pectin/polyethylenimin mixtures: Effects on flax shive and cement-shive composite properties.* Cement and Concrete Composites, 2012. **34**(2): p. 223-230.
182. Karade, S., *Cement-bonded composites from lignocellulosic wastes.* Construction and building materials, 2010. **24**(8): p. 1323-1330.
183. Amiandamhen, S. and D. Izekor, *Effect of wood particle geometry and pre-treatments on the strength and sorption properties of cement-bonded particle boards.* Journal of applied and natural science, 2013. **5**(2): p. 318-322.
184. Da Gloria, M.h.Y.R. and R.D. Toledo Filho. *Influence of the wood shavings/cement ratio on the thermo-mechanical properties of lightweight wood shavings-cement based composites*. in *6th Amazon & Pacific Green Materials Congress and Sustainable Construction Materials LAT-RILEM Conference*. 2016.
185. Coatanlem, P., R. Jauberthie, and F. Rendell, *Lightweight wood chipping concrete durability.* Construction and building Materials, 2006. **20**(9): p. 776-781.
186. Khazma, M., et al. *Microstructural study to evaluate treatment repercussion on aggregates/cement matrix interface in lightweight concrete*. in *Proceedings of the 30th International Conference on Cement Microscopy, Reno, NV, USA, ICMA*. 2008.
187. Benchouaf, A., et al., *Time-dependent behavior of eco-friendly sand concrete using treated wood shavings.* Mechanics of Time-Dependent Materials, 2023. **27**(2): p. 543-558.
188. Amianti, M. and V.R. Botaro, *Recycling of EPS: A new methodology for production of concrete impregnated with polystyrene (CIP).* Cement and concrete composites, 2008. **30**(1): p. 23-28.
189. Uysal, T., et al., *Production of activated carbon and fungicidal oil from peach stone by two-stage process.* Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2014. **108**: p. 47-55.

190. Marcovich, N.E., M.M. Reboredo, and M.I. Aranguren, *Composites from sawdust and unsaturated polyester.* Journal of applied polymer science, 1996. **61**(1): p. 119-124.
191. Benyoucef, S. and D. Harrache, *Microstructure characterization of scots pine "Pinus sylvestris" sawdust.* J. Mater. Environ. Sci, 2015. **6**(3): p. 765-772.
192. Alemdar, A. and M. Sain, *Isolation and characterization of nanofibers from agricultural residues–Wheat straw and soy hulls.* Bioresource technology, 2008. **99**(6): p. 1664-1671.
193. AFNOR, *NFP 18-452*, in *Bétons - Mesure du temps d'écoulement des bétons et des mortiers au maniabilimètre*. 2017.
194. Afnor, *NF EN 12350-6*, in *Essais pour béton frais - Partie 6 : masse volumique*. 2019.
195. AFNOR, *NF EN 12390-7*, in *Essais pour béton durci - Partie 7 : masse volumique du béton durci*. 2019.
196. AFNOR, *NF EN 12390-5*, in *Essais pour béton durci - Partie 5 : résistance à la flexion des éprouvettes*. 2019.
197. AFNOR, *NF EN 12390-3*, in *Essais pour béton durci - Partie 3 : résistance à la compression des éprouvettes*. 2019.
198. RILEM, *CPC 11.3*, in *Absorption d'eau par béton par immersion sous vide*. 1984.
199. ISO, *ISO 834-1:1999*, in *Essai de résistance au feu — Éléments de construction*. 1999.
200. AFNOR, *NF EN 12667*, in *Performance thermique des matériaux et produits pour le bâtiment - Détermination de la résistance thermique par la méthode de la plaque chaude gardée et la méthode fluxmétrique - Produits de haute et moyenne résistance thermique*. 2001.
201. Morales-Conde, M., P. Rubio-de-Hita, and F. Pérez-Gálvez, *Composite mortars produced with wood waste from demolition: Assessment of new compounds with enhanced thermal properties.* Journal of Materials in Civil Engineering, 2018. **30**(2): p. 04017273.
202. Bederina, M. and M. Quéneudec. *Characterization of river-dune sand concrete lightened by addition of wood shavings*. in *Second international conference on sustainable construction materials and technologies*. 2010.
203. Bederina, M., et al., *Effect of the addition of wood shavings on thermal conductivity of sand concretes: Experimental study and modelling.* Construction and Building Materials, 2007. **21**(3): p. 662-668.
204. Taoukil, D., et al., *Moisture content influence on the thermal conductivity and diffusivity of wood–concrete composite.* Construction and Building Materials, 2013. **48**: p. 104-115.
205. Guo, A., et al., *Impact of thermally modified wood on mechanical properties of mortar.* Construction and Building Materials, 2019. **208**: p. 413-420.
206. Siddique, R., M. Singh, and A.K. Singhal, *Use of unprocessed wood ash as partial replacement of sand in concrete.* ACI Materials Journal, 2019. **116**(6): p. 77-86.
207. Tamba, S., et al., *Durabilité des bétons légers à base de copeaux de bois.* Journal des sciences, 2007. **7**: p. 67-72.
208. Sotannde, O.A., et al., *Evaluation of cement-bonded particle board produced fromafzelia africanawood residues.* Journal of Engineering Science and Technology, 2012. **7**(6): p. 732-743.
209. Corinaldesi, V., A. Mazzoli, and R. Siddique, *Characterization of lightweight mortars containing wood processing by-products waste.* Construction and Building Materials, 2016. **123**: p. 281-289.
210. Khan, E.U., R.A. Khushnood, and W.L. Baloch, *Spalling sensitivity and mechanical response of an ecofriendly sawdust high strength concrete at elevated temperatures.* Construction and Building Materials, 2020. **258**: p. 119656.
211. Akçaözoğlu, S., *The effect of elevated temperature on the lightweight concrete containing waste PET aggregate.* International Journal of Business and Technology, 2018. **6**(3): p. 1-14.
212. Hager, I., *Behaviour of cement concrete at high temperature.* Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences, 2013(1).
213. da Luz Garcia, M. and J. Sousa-Coutinho, *Strength and durability of cement with forest waste bottom ash.* Construction and building Materials, 2013. **41**: p. 897-910.

214. Bederina, M., et al., *Combined effect of sand grain size and contents of wood and filler on the physicomechanical properties and the microstructure of lightweight sand concrete.* Journal of Adhesion Science and Technology, 2016. **30**(13): p. 1391-1412.
215. Dias, S., et al., *Physical, mechanical, and durability properties of concrete containing wood chips and sawdust: an experimental approach.* Buildings, 2022. **12**(8): p. 1277.
216. Ammari, M., et al., *Contribution of hybrid fibers on the improvement of sand concrete properties: Barley straws treated with hot water and steel fibers.* Construction and Building Materials, 2020. **233**: p. 117374.
217. Yu, B., *Les caractéristiques mécaniques et la microstructure du béton des granulats recyclés a hautes performances*. 2012, Université de Lorraine.
218. Kan, A. and R. Demirboğa, *Effect of cement and EPS beads ratios on compressive strength and density of lightweight concrete.* 2007.
219. Assaad, J.J. and A. El Mir, *Durability of polymer-modified lightweight flowable concrete made using expanded polystyrene.* Construction and Building Materials, 2020. **249**: p. 118764.
220. Shah, S.J., et al., *Experimental Investigation of Mechanical Properties of Concrete Mix with Lightweight Expanded Polystyrene and Steel Fibers.* CivilEng, 2024. **5**(1): p. 209-223.
221. Ramli Sulong, N.H., S.A.S. Mustapa, and M.K. Abdul Rashid, *Application of expanded polystyrene (EPS) in buildings and constructions: A review.* Journal of Applied Polymer Science, 2019. **136**(20): p. 47529.
222. Alhnifat, R.S. and R.N. Al-Dala'ien, *Behavior of Lightweight Concrete Incorporating Pozzolana Aggregate and Expanded Polystyrene Beads.* Engineered Science, 2023. **25**: p. 934.
223. El Gamal, S., et al., *Mechanical and thermal properties of lightweight concrete with recycled expanded polystyrene beads.* European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2024. **28**(1): p. 80-94.
224. Solomon, A.A. and G. Hemalatha. *Characteristics of expanded polystyrene (EPS) and its impact on mechanical and thermal performance of insulated concrete form (ICF) system*. in *Structures*. 2020. Elsevier.
225. Topacio, A. and M.C.M. Marcos. *Lightweight interlocking blocks using expanded polystyrene foam as partial replacement to coarse aggregates*. in *The 2018 World Congress on Advances in Civil, Environmental, & Materials Research (ACEM18). Songdo Convensia: Incheon, Korea*. 2018.
226. Carvalho, C. and L. Motta, *Study about concrete with recycled expanded polystyrene.* Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, 2019. **12**: p. 1390-1407.
227. Adeala, A.J. and O.B. Soyemi, *Structural use of expanded polystyrene concrete.* International Journal of Innovative Science and Research Technology, 2020. **5**(6): p. 1131-1138.
228. Assaad, J., E. Chakar, and G.-P. Zéhil, *Testing and modeling the behavior of sandwich lightweight panels against wind and seismic loads.* Engineering Structures, 2018. **175**: p. 457-466.
229. Dixit, A., et al., *Lightweight structural cement composites with expanded polystyrene (EPS) for enhanced thermal insulation.* Cement and Concrete Composites, 2019. **102**: p. 185-197.
230. Selvaratnam, A., J. Gamage, and G. De Silva. *EPS blended cementitious plaster for improved thermal comfort in buildings*. in *ICSBE 2020: Proceedings of the 11th International Conference on Sustainable Built Environment*. 2022. Springer.
231. Raji, S., S. Abdulkareem, and A. Adeniyi. *Fire Resistance Properties Of Polystyrene-Sand Concrete*. in *Proceeding of the 18th Annual International Materials Congress for the Materials Society of Nigeria (MSN)*. 2019.
232. Lo Monte, F., P. Bamonte, and P.G. Gambarova, *Physical and mechanical properties of heat-damaged structural concrete containing expanded polystyrene syntherized particles.* Fire and Materials, 2015. **39**(1): p. 58-71.
233. Hajduković, M., et al., *Fire performance of external thermal insulation composite system (ETICS) facades with expanded polystyrene (EPS) insulation and thin rendering.* Fire technology, 2017. **53**: p. 173-209.

234. Vilches, J., M. Ramezani, and T. Neitzert, *Experimental investigation of the fire resistance of ultra lightweight foam concrete.* International Journal of Advanced Engineering Applications, 2012. **1**(4): p. 15-22.
235. Beju, Y. and J. Mandal, *Expanded polystyrene (EPS) geofoam: preliminary characteristic evaluation.* Procedia engineering, 2017. **189**: p. 239-246.
236. Chen, W., et al., *Static and dynamic mechanical properties of expanded polystyrene.* Materials & Design, 2015. **69**: p. 170-180.
237. Sotiropoulou, A., et al., *Experimental study of wood shaving addition in mortar and statistical modeling on selected effects.* Journal of the Mechanical Behavior of Materials, 2017. **26**(1-2): p. 55-63.
238. Baltazar, L.G. *Use of wood waste as aggregate in mortars: An experimental study*. in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. IOP Publishing.
239. Zare, S. and A. Kargari, *Membrane properties in membrane distillation*, in *Emerging technologies for sustainable desalination handbook*. 2018, Elsevier. p. 107-156.
240. Laoubi, H., et al., *Durability of a lightweight construction material made with dune sand and expanded polystyrene.* Journal of Adhesion Science and Technology, 2019. **33**(19): p. 2157-2179.
241. Koksal, F., E. Mutluay, and O. Gencel, *Characteristics of isolation mortars produced with expanded vermiculite and waste expanded polystyrene.* Construction and Building Materials, 2020. **236**: p. 117789.
242. Ayse, K. and K. Filiz, *Properties of concrete containing waste expanded polystyrene and natural resin.* Construction and building materials, 2016. **105**: p. 572-578.
243. Zireque, A., *Valorisation de coproduits industriels influence de différents facteurs d'allegement sur les caractéristiques physico-mécaniques et thermiques d'un beton a matrice calcaire-ciment*. 2005, Laghouat, Centre Universitaire Amar Telidji. Faculté des Sciences et de L ….
244. Fu, Q., et al., *Interfacial bond behavior between wood chip concrete and engineered timber glued by various adhesives.* Construction and Building Materials, 2020. **238**: p. 117743.
245. Seid, A.M., et al., *Recent Progress on the Physical, Thermal, and Mechanical Properties of Expanded Polystyrene Waste–Based Composites.* International Journal of Polymer Science, 2025. **2025**(1): p. 9285040.
246. López-Gómez, Y.M., et al., *Effects of tannin-geopolymer impregnation on wood: leachability, biodegradation resistance and mechanical properties.* European Journal of Wood and Wood Products, 2025. **83**(1): p. 17.
247. Dias, S., et al., *Alternative concrete aggregates-Review of physical and mechanical properties and successful applications.* Cement and Concrete Composites, 2024: p. 105663.
248. Guermiti, L., et al., *Characterisation of lightweight concrete blocks made from dune sand and wood chips.* Studies in Engineering and Exact Sciences, 2024. **5**(1): p. 1279-1295.
249. Wijesinghe, K., et al., *Thermal and acoustic performance in textile fibre-reinforced concrete: An analytical review.* Construction and Building Materials, 2024. **412**: p. 134879.