

Ordre/F.S.S.A/UAMOB/2020

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ-BOUIRA



Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées
Département de Génie Civil

Mémoire de fin d'étude

Présenté par

Melle: HABBOUCHISarra

Melle : GUETTAL Sabrina

En vue de l'obtention du diplôme de **Master 2** en :

Filière : Génie Civil

Spécialité : Matériaux en Génie Civil

Thème :

Recherche bibliographique sur les mortiers légers.

Devant le jury composé de :

Mr. ARIBI Chouaib	MCB	UAMOB	Président
Mr. Hami Brahim	MCB	UAMOB	Encadreur
Mr. KENNOUCHE Salim	MCB	UAMOB	Examineur

Année Universitaire 2019/2020

Remerciements

Nous rendons grâce à Dieu le tout-puissant de nous avoir donné le savoir et la volonté, surtout la patience pour réaliser ce travail.

Ce travail a été réalisé à l'Université d'AKLI MOHAND OULHADJD BOUIRA, Nous voudrions particulièrement remercier notre encadreur, Monsieur **HAMI Brahim**, Enseignant à l'Université de Bouira, pour nous avoir encadré et suivi pour la réalisation de ce mémoire de fin d'études. Nous tenons à souligner sa disponibilité, son soutien qu'il nous a apporté, ses idées et ses orientations.

Enfin, pour ne pas oublier de remercier nos **chers parents, qui nous ont** transmis le savoir et la bonne conduite et nous remercions aussi nos **amis** pour leur soutien moral qui a été précieux pour nous surtout dans les moments difficiles.

Dédicaces

Je tiens à dédier ce modeste travail à mes **chers parents** ma raison de vivre, quoi que je dise ou, que je fasse je n'arrive pas à exprimer mes sentiments vers eux pour les remercier comme il se doit, vous étiez toujours à mes côtés pour me soutenir et m'encourager, Vous m'avais tout donné pour me voir réussir.

Mes chères sœurs, Lamia et Linda

Mon très cher frère Mohamed islam

Et sans oublier mes très chères amies Sabrina, Dahia, Aicha, Yasmina et Fatima

Aussi à mes amis Mohamed, Majid, Fahem, et Chaabane

À tous mes amis et collègues de la promotion 2018/2019 et la promotion 2019/2020.

Dédicaces

Avec un énorme plaisir, un cœur ouvert et une immense joie, que je dédiais mon travail :

À mes très chers, respectueux et magnifiques parents qui m'ont soutenu tout au long de ma vie.

À mes frères et mes grands-mères

Aux familles **Guettal et Gouzi**.

À mon binôme sarra qui a contribué à la réalisation de ce travail.

Et à toutes mes amis(es) avec lesquels j'ai passé les plus beaux moments :

nadira , zaho,dihia, aicha , naima, nesrine, zahia. Amel.

Sans oublier notre cher enseignant qui nous a quitté Mr. **Belaid Amrane** que Dieu l'accueille dans son vaste paradis.

Et tous les étudiants du groupe matériaux en génie civil.

À toute personne qui m'a encouragé et aidé au long de mon parcours académique.

Résumé

Ce mémoire présente une étude sur les caractéristiques physico-mécaniques des mortiers et bétons légers. Le béton léger qui est un matériau ancien et en même temps nouveau, il fait partie de la gamme des bétons spéciaux. Ces caractéristiques suggèrent de nouvelles applications. Pour notre étude on a choisi les bétons légers produits à partir de granulats légers, cette contribution dans la recherche sur les différents granulats légers fixe comme objectif la réduction de l'utilisation des granulats usuels et la conservation des ressources naturelles. Ces bétons ont une faible conductivité thermique et une bonne isolation acoustique. Par conséquent, ils peuvent être une solution technique très intéressante au problème d'isolation thermique et acoustique dans les bâtiments.

Notre manuscrit présente une étude sur les mortiers et les bétons légers. Il est constitué de deux parties la première partie est une étude théorique, dont laquelle nous avons présenté des généralités sur les mortiers et les bétons légers, ainsi qu'une étude sur les matériaux utilisés pour l'élaboration des mortiers et béton léger. La deuxième partie c'est une recherche bibliographique, dont laquelle nous avons présenté des travaux de recherche qui ont été réalisés sur les mortiers et bétons légers.

Mot clé : béton léger, mortier, propriétés mécaniques, masse volumique, liège, polystyrène, Coques de noix de palme, grignons d'olive.

A b s t r a c t

This thesis presents a study on the physico-mechanical characteristics of lightweight mortars and concrete. Light weight concrete, which is an old and at the same time new material, is part of the range of special concretes. These characteristics suggest new applications. For our study we chose light concrete produced from light aggregates, this contribution to research on different light aggregates sets as an objective the reduction of the use of usual aggregates and the conservation of natural resources. These concretes have low thermal conductivity and good sound insulation. Therefore, they can be a very interesting technical solution to the problem of thermal and acoustic insulation in buildings.

Our manuscript presents a study on mortars and lightweight concrete. It consists of two parts the first part is a theoretical study, of which we have presented generalities on mortars and lightweight concrete, as well as a study on the materials used for the preparation of mortars and lightweight concrete. The second part is a bibliographic research, of which we presented research work that was carried out on mortars and lightweight concrete.

Keyword: lightweight concrete, mortar, mechanical properties, density, cork, polystyrene, palm nut shells, olive pomace.

المخلص

تقدم هذه الرسالة دراسة عن الخصائص الفيزيائية - الميكانيكية للملاط والخرسانة خفيفة الوزن. تعتبر الخرسانة خفيفة الوزن، وهي مادة قديمة وجديدة في نفس الوقت، جزءاً من مجموعة الخرسانة الخاصة. تشير هذه الخصائص إلى تطبيقات جديدة لأرستنا، اخترنا الخرسانة الخفيفة المنتجة من الحصى الخفيف، وهذه المساهمة في البحث على الحصى الخفيف تضع كهدف التقليل من استخدام الحصى المعتاد والحفاظ على الموارد الطبيعية. تتميز هذه الخرسانة بموصلية حرارية منخفضة وعزل صوتي جيد. لذلك، يمكن أن تكون حلاً تقنياً مثيراً للاهتمام لمشكلة العزل الحراري والصوتي في المباني.

تقدم أطروحتنا دراسة حول الملاط والخرسانة خفيفة الوزن. يتكون من جزأين، الجزء الأول عبارة عن دراسة نظرية، قدمنا فيها معلومات حول الملاط والخرسانة خفيفة الوزن، بالإضافة إلى دراسة حول المواد المستخدمة في تحضير الملاط والخرسانة خفيفة الوزن. الجزء الثاني عبارة عن بحث ببيولوجرافي قدمنا فيه أعمال بحث تم إجراؤها على الملاط والخرسانة خفيفة الوزن.

الكلمات الرئيسية: الخرسانة خفيفة الوزن، الملاط، الخواص الميكانيكية، الكثافة، الفلين، البوليسترين، قشور جوز النخيل، ثقل الزيتون.

Sommaire

Introduction Générale	1
Introduction	3
Définition	3
Mortier	3
Classification des mortiers	5
Constituants des mortiers	5
Propriétés des mortiers	6
Béton léger	7
Classification des bétons légers	7
Granulats légers	9
Différents types de granulats légers	10
Propriétés des bétons légers	12
Les propriétés physiques	12
La masse volumique	12
La porosité	13
1.3.1.3. Légèreté	14
La sensibilité à l'eau	14
Durabilité	15
La rhéologie à l'état frais	15
Propriétés mécaniques	15
Résistance en compression	15
1.3.4. Propriétés thermiques	18
Les avantages et les inconvénients des bétons légers	18
Avantage	18
Avantages techniques	18
Avantages de la mise en œuvre	19
Avantages économiques	19
Inconvénients des bétons légers par rapport au béton ordinaire	19
Domaine d'utilisation des bétons légers	20
Isolants	20
Isolant porteur	20

Bétondestructure.....	20
Conclusion	21
Introduction	22
Déchet d'olives (lesgrignons)	22
Introduction	22
Définition.....	23
Types degrignons d'olive	23
Caractéristiquesphysiques	23
Composition chimiquedegrignon.....	24
Le grignon comme ingrédient des matériauxdeconstruction.....	25
Traitement de la farine degrignon d'olive	25
Différentes filières de valorisation des grignonsd'olives	25
II.2.8.Conclusion	26
Coques de noixdepalmier.....	26
Introduction	26
Origine et historique.....	27
Définition.....	27
II.3.4.1. Propriétés physico-mécaniques du bétondeCNP	28
II.3.5.Conclusion	30
Lepolystyrène	30
Introduction	30
Définitiondepolystyrène	31
Compositionchimique	31
La fabrication dupolystyrèneexpansé.....	32
La polymérisation du styrène additionnéed'agent pyrogène	32
Lemoulage	33
Propriétésdu polystyrène	34
Densité.....	34
Résistance àlachaleur.....	34
Absorption	34
Conductivitéthermique	34
Résistance àlacompression.....	35

Lamassevolumique	35
Ladurabilité	35
Résistance à la compression.....	35
Comportement mécanique du béton à base de polystyrène	35
Avantages d'utilisation du béton légers à base de polystyrène.....	36
Leliège	37
Introduction	37
Définition deliège	37
Structure du liège	38
Composition chimique du liège.....	38
Préparation du liège	39
Ecorçage ou démasclage.....	39
Triage et séchage.....	39
Bouillage.....	39
Stabilisation.....	39
Deuxième bouillage.....	39
Classement.....	39
Différents usages du liège	40
Béton deliège	40
Conclusion	41
III. Etude bibliographique sur les mortiers légers.....	42
En 7 février 2020, une étude réalisée par Maelson M. et al.....	42
Conception et fabrication d'agrégats légers	42
Caractérisation des agrégats légers	43
Résultat et discussion.....	44
Classification des agrégats légers fabriqués	50
Conclusion.....	51
Cette recherche faite le 9 novembre 2019 par M. Kalpana et Ahoh Tayu.....	52
Matériaux et méthodes.....	52
Résultat et discussion.....	53
Conclusion.....	55
En août 2019 une recherche faite par Nahla Naji Hilalet al.....	56

Matériaux utilisés	56
Préparation des mélanges	57
Procédure expérimentale	58
Résultat et discussions	58
Conclusion	62
En Mars 2019, une étude faite par Tayyib Cheboubet al	63
Préparation des composites	63
Les essais réalisés sources mortiers	63
Conclusion générale	70

Liste des figures

Figure I.1 Constituants des mortiers	4
Figure I.2. Classification des bétons légers d'après Lafarge Bétons Granulats	8
Figure I.3. Le béton cellulaire	9
Figure I.4. Différents granulats légers naturels	11
Figure I.5. Différents granulats légers artificiels	12
Figure I.6. Masses Volumiques des Bétons Durcis-en(kg/m^3).....	13
Figure I.7. Variation de la porosité en fonction de la composition de béton.....	13
Figure I.8. Variation de la porosité en fonction de la composition de béton.....	14
Figure I.9. Evolution de la masse volumique en fonction de dosage en liège.....	14
Figure I.10. Evolution de la résistance à la compression à 28j en fonction de la teneur en polystyrène pour $E/C=0.45$ & 0.5	16
Figure I.11. Résultats des efforts maximaux de compression uni-axiale pour éprouvettes humides et sèches à base de billes non enrobées	16
Figure I.12. Résistance à la compression (Mpa) en fonction des jours avec le dosage du ciment $C=500$ kg et 1% plastifiant	17
Figure I.13. La relation entre la résistance à la compression de 28 jours et la densité du béton de ciment. Mélange d'agrégats légers	17
Figure II.1. Grignons d'olives	23
Figure II.2. Section transversale du grignon d'olive avec ses différentes parties	24
Figure II.3. Différentes filières de valorisation des grignons d'olives	26
Figure II.4. Coques de noix de palme décortiquées	27
Figure II.5. Eprouvettes de béton de CNP écrasées à 90 jours	29
Figure II.6. Polystyrène sous sa forme commerciale.....	31
Figure II.7. Modèle pelote bâtonnet de Polystyrène.....	31
Figure II.8. Polymérisation du monomère de styrène en polystyrène	32
Figure II.9. Phases de pré expansion et de moulage du P. S.E.....	33
Figure II.10. Polystyrène expansé (PSE)	33
Figure II.11. Polystyrène expansé moulé (PSE-M).....	34
Figure II.12. Polystyrène expansé extrudé (PSE-X).....	34
Figure II.13. Evolution de la résistance à la compression en fonction du pourcentage des billes de polystyrène.....	36
Figure II.14. Evolution de la résistance en flexion en fonction du pourcentage des billes de polystyrène	36
Figure II.15. Distribution du chêne liège dans le bassin méditerranéen	37

Figure II.16. Récupération du Liège.....	38
Figure II.17. Structure cellulaire du liège.....	38
Figure II.18. Le cycle de production du liège.....	40
Figure III.1. Composition chimique des mélanges dans le diagramme de Riley.....	43
Figure III.2. Photographies de LWA fabriquées avec des échantillons W, Y et AA.....	47
Figure III.3. Relation entre la quantité de SS et la perte de masse des agrégats légers fabriqués.....	47
Figure III.4. Images de microscopie électronique à balayage.....	49
Figure III.5. La résistance moyenne à la compression.....	54
Figure III.6. La résistance moyenne à la traction.....	54
Figure III.7. La résistance moyenne à la flexion.....	55
Figure III.8. Les matériaux utilisés dans le mélange.....	57
Figure III.9. Mesure du diamètre d'écoulement à affaissement pour WS50.....	58
Figure III.10. Diamètre d'écoulement des différents mélanges réalisés.....	59
Figure III.11. Résistance à la compression et force de liaison en fonction de la teneur de coques de noix usagée.....	60
Figure III.12. Force de liaison en fonction de la teneur de coques de noix usagées.....	61
Figure III.13. Densité relative à l'état frais et durci en fonction de la teneur de coques de noix usagées.....	61
Figure III.14. Evolution des résistances à la compression de différents mortiers.....	64
Figure III.15. Evolution des résistances à la traction en flexion des mortiers En fonction de temps.....	65
Figure III.16. Observations microscopiques des mortiers durcis.....	66
Figure III.17. Résultats des tests UPV des composites contenant différents pourcentages de particules COK.....	66
Figure III.18. Les résultats de l'absorption capillaire des échantillons après une immersion de 24 Heures dans l'eau.....	67
FIGURE III.19. L'évolution de la conductivité thermique en fonction de la teneur en particules COK.....	68

Liste des tableaux

Tableau I.1. Classification des bétons légers	7
Tableau I.2. Caractéristiques de béton de granulats légers (BGL)	10
Tableau I.3. Comparaison des résistances de bétons légers et classiques en fonction de leur dosage en ciment	18
Tableau II.1. Composition chimique indicative de grignons d'olives	24
Tableau II.2. Caractéristiques physiques des coques de noix de palme (CNP)	29
Tableau II.3. Capacité d'absorption d'eau en 24 heures des CNP avant et après traitements. 29	29
Tableau II.4. Résistance mécanique à la compression	30
Tableau II.5. Pourcentages massiques des différents constituants du liège	39
Tableau III.1 Composition chimique des matières premières	42
Tableau III.2 Indice de ballonnement des échantillons	45
Tableau III.3. Densité, absorption, résistance mécanique des agrégats légers	46
Tableau III.4. Classification des agrégats légers selon le type d'application	51
Tableau III.5. Les proportions des trois types de mélanges réalisés	53
Tableau III.6. Résultats des essais de résistance mécanique à la compression	54
Tableau III.7. Résultats des essais de résistance mécanique à la traction	55
Tableau III.8. Résultat des essais de flexion	55
Tableau III.9. Résultats expérimentaux des différents mélanges réalisés	59
Tableau III.10. Formulation de divers mortiers composites	63

Introduction Générale

Introduction Générale

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé. Il est composé d'un mélange d'agrégats minéraux rigides, de sable, de ciment et d'eau. Une petite quantité d'adjuvant peut être ajoutée à la formule de base pour obtenir certaines qualités telles que la fluidité, l'accélération ou le retardement du temps de prise, etc. Des matériaux tels que des tiges d'acier peuvent être incorporés pour améliorer les propriétés mécaniques du composite. En raison de ses performances élevées, le béton est utilisé exclusivement à des fins structurelles [1].

Le béton est un matériau facile à mouler dans n'importe quelle forme, durable, économique, résistant au feu et à faibles coûts d'entretien. Afin d'utiliser pleinement le béton, il est important de comprendre ses propriétés : d'une part, à l'état frais, lorsqu'il est plastique et peut être traité ; d'autre part, à l'état durci, sa forme ne change plus, mais ses propriétés continuent à se développer des mois voire des années[2].

Sa densité élevée est comprise entre 2200 et 2600 kg/m³, ce qui en fait un bon matériau d'isolation acoustique. En ce qui concerne l'isolation thermique, c'est un matériau moins intéressant [1]. C'est pourquoi le nouveau béton dit léger est apparu. Par rapport au béton traditionnel, la densité du béton léger est beaucoup plus faible, généralement inférieure à 1800 kg/m³[3]. Ils offrent de meilleures propriétés d'isolation thermique que le béton conventionnel tout en maintenant une certaine limite inférieure de propriétés mécaniques. Ces propriétés font que cette série de béton évite l'utilisation de matériaux isolants supplémentaires [1]. Une faible densité et une bonne isolation thermique sont les principales raisons de l'existence d'un béton léger. Cependant, le béton léger présente également d'autres avantages, tels que : la résistance au feu, la résistance au gel et leur sensibilité globale à la corrosion physique et chimique traditionnelle dans l'industrie de la construction[4].

Notre mémoire présente une étude théorique et une synthèse des travaux de recherche réalisés sur les mortiers et bétons légers. Ce manuscrit est subdivisé en trois chapitres, dont les deux premiers chapitres présentent la partie théorique et le troisième chapitre est une recherche bibliographique réalisée sur les mortiers et bétons légers.

Le premier chapitre, présente des généralités sur les mortiers et les bétons légers, dont lequel nous avons exposé les différents types de mortiers, la classification des mortiers et les principales propriétés physico-chimiques et mécaniques des mortiers.

Le deuxième chapitre est une étude sur les matériaux utilisés dans les mortiers et béton léger, dans ce chapitre nous avons parlé des matériaux légers utilisés dans les mortiers et bétons léger tels que les grignons d'olive, les coques de noix de palmier, le polystyrène et le liège. Nous avons aussi présenté quelques travaux réalisés sur les bétons légers.

Le dernier chapitre présente les travaux de recherche récents réalisés sur le mortier et le béton légers. Dont lequel des études ont été faites sur plusieurs types de matériaux légers, ainsi que des méthodes d'élaborations et de caractérisation ont été présentées.

Enfin, nous allons terminer notre mémoire par une conclusion générale.

Chapitre I
Généralités sur les mortiers et les
bétons légers

Introduction

Le béton léger de renommée mondiale depuis plus de 25 ans. Le **R.I.L.E.M** propose de définir le béton léger comme du béton de densité apparente sèche est inférieure à 1800 kg/m^3 . Mais un autre auteur utilise une définition légèrement différente, CORMON appelle béton léger dans les conditions suivantes, sa densité apparente sur 28 jours est inférieure à 1800 Kg/m^3 (1973) stockage normal (température 20° , humidité relative 65%). De même l'American concrete association limite la densité apparente du béton à 1800 kg/m^3 après séchage à l'air pendant 28 jours. D'un autre côté, KINNIBURG pense que la densité apparente sèche du béton léger doit être inférieure à 1775 kg/m^3 . En Allemagne, la norme DIN1042 sorti en 1972, la densité limite de béton léger est estimée à 2000 kg/m^3 . Enfin, la densité après séchage est comprise entre 800 et 2100 Kg/m^3 , il est entièrement ou partiellement constitué de granulats légers. Par conséquent, il est difficile de définir avec précision le béton en termes de limites plus grande que la densité apparente.

Cependant, la définition proposée par CORMON semble être la plus intéressante car elle est proche de la limite de densité qui est généralement acceptée, surtout parce que c'est la plus précise [5].

Définition

Mortier

Le mortier est l'un des matériaux de construction, composé essentiellement de ciment ; de l'eau ; du sable ; des adjuvants et des additifs, qui présente une bonne ouvrabilité à l'état frais et des propriétés physico-mécaniques définies à l'état durci. Le mortier obtenu par le mélange d'un liant, agrégats, d'eau et éventuellement d'additions. Des compositions diverses de mortier peuvent être obtenues en jouant sur les différents paramètres : type et dosage de liant, adjuvants et ajouts, dosage en eau.

En ce qui concerne le liant, tous les ciments sont utilisables ; leur choix et leur dosage sont en fonction de l'ouvrage à réaliser et de son environnement. Sont très utilisés pour les travaux de tous types (finition, chapes, revêtement...etc.).

Le mortier est un matériau composite hétérogène. A l'échelle macroscopique, il a une structure constituée de pâte de ciment, de sable de différentes tailles, de forme, de pore, de micro fissure d'une zone de transition inter faciale localisée autour des grains de sable. Le comportement mécanique en traction des mortiers dépend de sa microstructure, de la qualité et de l'interface matrice granulats[6].

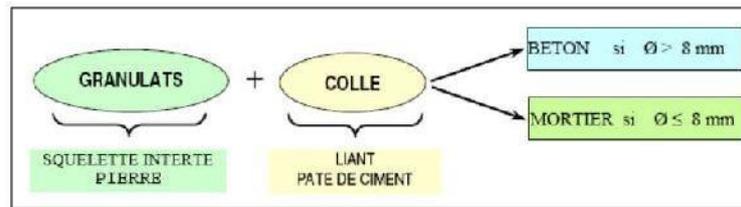


Figure I.1 Constituants des mortiers

Les principales fonctions du mortier sont les suivantes :

- Solidariser les éléments entre eux : qui assure les liaisons entre les éléments de maçonnerie.
- Remplir les interstices entre les blocs de construction : le mortier contribue au remplissage de toutes les fentes et fissures en formant une surface de contact homogène.
- Garantir la stabilité de l'ouvrage : renforcer les propriétés structurales[7].

On différencie les divers mortiers d'après divers indices dont les plus importants sont la résistance mécanique, la masse volumique, la destination et la catégorie du liant entrant dans la préparation du mortier.

On différencie les divers mortiers d'après divers indices dont les plus importants sont la résistance mécanique, la masse volumique, la destination et la catégorie du liant entrant dans la préparation du mortier.

• **Selon leur masse volumique on distingue:**

- Mortiers lourds dont la masse volumique est supérieure à 1500kg/m^3 .
- Mortiers légers dont la masse volumique est inférieure à 1500kg/m^3 .

• **Selon leur destination on distingue:**

- Mortiers de maçonnerie : l'assemblage des éléments exige assure la transmission des charges.
- Mortiers d'enduit: la protection, l'adhérence, et l'aspect décoratif, ils ne sont pas soumis à des actions mécaniques importantes.

• **Selon le liant employé on distingue:**

- Mortiers aériens : mortier de chaux, mortier de plâtre.
- Mortiers hydrauliques : mortier de ciment.
- Mortiers bâtards : mortier de ciment+chaux, chaux+terre, ou chaux+plâtre [8][9].

Classification des mortiers

➤ Selon leurs domaines d'utilisation

En général, les variétés de mortier sont liées directement par son domaine d'application, à partir de son utilisation permet de citer les catégories suivantes :

- ✓ Mortier de pose.
- ✓ Mortier de joints.
- ✓ Mortier pour les crépis.
- ✓ Mortier pour les sols.
- ✓ Mortier pour les stucs.
- ✓ Pierres artificielles.
- ✓ Support pour les peintures murales.
- ✓ Mortier d'injection.
- ✓ Mortier pour les mosaïques.
- ✓ Mortier de réparation pour.
- ✓ Mortier auto plaçant.
- ✓ Mortier fibré.

➤ Selon la nature du liant utilisé

Les mortiers peuvent être classés selon la nature du liant utilisé, qui peut être résumé comme suit : [10] [11]

- ✓ Mortier de ciment portland.
- ✓ Mortier de chaux.
- ✓ Mortiers bâtards.
- ✓ Mortier à base de ciment de maçonnerie.
- ✓ Mortier réfractaire.
- ✓ Mortier rapide.
- ✓ Mortier industriel.

Constituants des mortiers

➤ Le sable

C'est un matériau minéral siliceux ou calcaire qui se présente dans le sol sous la forme de grains ou de poudre, suivant qu'il s'agit de sable grossier ou de sable fin. Les sables résultent de la désagrégation des roches suivant leur composition, ils sont blancs, jaunes, gris ou rougeâtres. On peut classer les sables d'après leur origine et distinguer les sables de carrière, les sables de mer et les sables de rivières [12].

➤ **LeLaint**

Généralement on utilise des liants hydrauliques qui peuvent être le ciment, ce dernier est une substance pulvérulente à base de silicate et d'aluminate, et de chaux. (Ciments normalisés, liants à maçonner, chaux éteintes... etc.)[13].

➤ **L'eau degâchage**

Est un élément essentiel pour la fabrication du béton ou mortier. Elle est ajoutée lors du mélange a fin d'hydrater le ciment et permet de lier les constituants du béton entre eux. Est nécessaire pour le mouillage des granulats ; et la facilité de mise en œuvre du béton ou de mortier.

➤ **Lesadditifs**

Substance en fines particules qui peuvent être ajoutés à un ciment, à dose faible, pour des raisons technologiques ou pour en améliorer certaines caractéristiques et pour influencer certaines propriétés ou obtenir des propriétés particulières, des matériaux en quantités limitées. Ils sont à pris en compte dans la composition volumétrique. On peut distinguer : les colorants ; les adjuvants ; les ajouts[14].

Propriétés desmortiers

a) Ouvrabilité

C'est une qualité essentielle ; nécessaire latitude par rapport aux bonnes et plus au moins rigoureuses règles à appliquer pour une exécution optimale. Une bonne ouvrabilité comporte une marge de sécurité [15].

La capacité d'un mortier à garder une certaine ouvrabilité sous l'influence de la succession des blocs dépendent de son pouvoir de rétention d'eau mesurée lors d'essais en laboratoire.

b) La prise

Le temps de prise est mesuré habituellement sur une pâte pure de ciment de consistance normale (24à30% d'eau) et conformément à la norme concernée (à l'aide de l'appareil de Vicat). Il est possible d'obtenir le temps de prise d'un mortier avec le même appareillage mais en plaçant une surcharge de 700 grammes sur le plateau supérieur. Le poids de l'aiguille pénétrant dans le mortier est de 1000 grammes. Le début de prise est l'instant où l'aiguille s'arrête à 2,5 mm du fond et la fin de prise est l'instant où l'aiguille s'arrête à 2,5 mm du niveau supérieur.

c) Résistancemécanique

La résistance mécanique prend l'importance majeure par rapport aux autres propriétés de mortier durci, les essais sont souvent effectués sur les éprouvettes prismatiques de (4x4x16) cm³ conservés dans l'eau à 20°C ; la résistance se présente sous deux aspects : compression et traction.[16].

Le béton est un terme générique qui définit un matériau de construction composite fabriqué à partir de granulats (sable, gravillons) agglomérés par un liant. Fait partie de la gamme des bétons spéciaux ses caractéristiques, suggèrent de nouvelles applications, ce qui le distingue du béton ordinaire est sa faible masse volumique. En effet la masse d'un béton de densité normale varie de 2200 à 2600 Kg/m³, tandis que celle du béton léger oscille entre 300 et 1850 Kg/m³[17]

Le béton léger est constitué en partie ou en totalité de granulats légers, de liants hydrauliques ou de résines synthétiques (époxydes, mousses de polyuréthane, etc...). En fait, la majorité de ces bétons à une masse volumique faible, Comparativement à celle des bétons conventionnels comprise entre 2200 et 2600 kg/m³[18].

Le béton léger se caractérise essentiellement par sa faible masse volumique, adaptable aux exigences, par son excellent rapport poids/résistance mécanique et par sa bonne isolation thermique, sa résistance à la chaleur et au feu, sa résistance au gel ainsi que par son insensibilité générale aux agressions physiques et chimiques traditionnelles dans le domaine de la construction. [19] (Tableau1.1).

Tableau I.1. Classification des bétons légers [20]

Classification	(Kg /m ³)	RC (MPa)
Béton léger de structure.	1350-1900	> 7
Béton léger de résistance modérée.	800-1350	7-17
Béton de faible résistance.	300-800	<7

I.2.2.1. Classification des bétons légers

Peuvent être aussi classés en fonction de leurs masses volumiques apparentes, selon leur utilisation dans les structures, comme suit :

➤ Les bétons deremplissage

Leurs résistances en compression sont souvent faibles et leurs caractéristiques thermiques sont bonnes et leur masse volumique apparente est comprise entre 300 et 1000 kg/m³ [21].

➤ Les bétons porteursisolants

Leur masse volumique apparente est entre 1000 et 1400 kg/m³, leurs résistances mécaniques sont nettement meilleures que celles des précédents et leurs caractéristiques thermiques sont acceptables. On les utilise habituellement pour des éléments préfabriqués.

➤ Les bétons de structure

Leur masse volumique est comprise entre 1400 et 1800 kg/m³. Ils sont destinés à la construction des structures grâce à leurs résistances mécaniques qui peuvent être du même ordre de grandeur que celles des bétons ordinaires. Leur pouvoir isolant est faible [22].

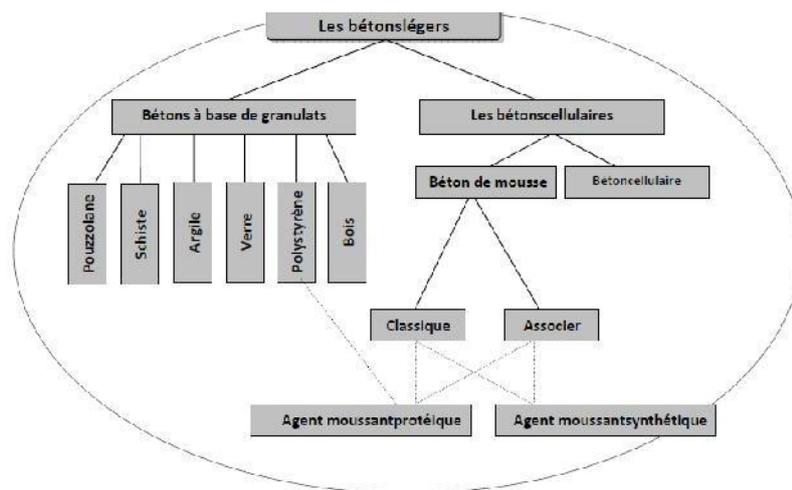


Figure I.2. Classification des bétons légers d'après Lafarge Bétons Granulats [23].

➤ Le béton cellulaire

Le béton cellulaire est issu de longues recherches, entamées il ya plus de 150 ans. A cette époque, Zernike étudie des mortiers à base de chaux vive et de sable portés à haute température [24].

Les bétons cellulaires sont en général des mortiers remplis de petites bulles d'air. Ces mortiers sont des mélanges de sables et de ciment portland. Les bulles sont créées à l'intérieur de la pâte grâce aux agents moussants qui sont utilisés dans le béton pour fabriquer un volume d'air important on cite parmi ces agents la poudre d'aluminium.

Le béton léger « cellulaire » ou « aéré » s'avère être le béton le plus susceptible de remplir les objectifs du système de plancher projeté. Le béton cellulaire est un matériau mouillable, malléable, léger, durable et relativement résistant. Ce sont toutes des propriétés que les auteurs Agustín et al. (1990) démontrent. Comme étant des propriétés à rechercher pour l'habitation à faible coût. Le béton cellulaire non traité à l'autoclave, nécessite peu d'outillage spécialisé et peut être assemblé sans trop de machinerie [25].

Les bétons cellulaires ont généralement une masse volumique et une résistance à la compression extrêmement faibles. L'utilisation la plus courante des bétons cellulaires se limite au béton de remplissage dans des murs, plafonds, plancher[18].



Figure I.3. Le béton cellulaire

➤ Les bétons caverneux

Ces bétons sont composés d'un mélange de granulats normaux ou légers, enrobés de pâte de ciment. La pâte de ciment ne remplit pas la totalité des vides interstitiels, et de l'air reste contenu entre les granulats. En fait, il s'agit de bétons dont on a supprimé une partie de l'élément fin et du liant correspondant servant à son enrobage ces bétons ont donc une porosité élevée ; ils sont drainants. Buts recherchés : béton économiques, gains de poids, bonne isolation thermique [26][27].

On les utilise principalement dans la confection de murs porteurs de bâtiments domestiques et dans les panneaux de remplissage de cadres de structure. Ainsi pour des ouvrages requérant des propriétés drainantes, tels les puits de captage des eaux de ruissellement, confection des éléments architecturaux [18].

Granulats légers

Le béton de granulat léger, n'est pas une nouvelle invention en technologie de béton. On l'a connu depuis des périodes antiques, ainsi il est possible de trouver un bon nombre de références en liaison avec l'utilisation de béton granulats légers[28].

Les bétons légers pour les produits de structure présentent des masses volumiques réelles sèches comprises entre 1200 et 2000 Kg/m³ et des résistances à la compression comprises entre 25 et 80 MPa [29] (**Tableau 1.2**)

Les bétons de granulats légers sont généralement classés suivant l'origine du granulat utilisé, ainsi on distingue 04 types :

- 1) Les granulats légers naturels : la ponce ou la pouzzolane, matériaux volcaniques naturels de structures très poreuse. Bétons légers béton à base de granulats légers Béton cellulaire schiste argile verre PSE bois béton mousse béton cellulaire.
- 2) Les granulats légers ayant subi un traitement thermique : granulats d'argile, de schiste, d'ardoise ou de perlite expansée.
- 3) Les granulats légers de matériaux artificiels : le mâchefer, sous-produit de la combustion de charbon ou des ordures ménagères.
- 4) Les granulats légers de matériaux artificiels ayant subi des traitements spéciaux : Granulats de nombreux déchets industriels, comme le laitier de hauts fourneaux.

Tableau I.2. Caractéristiques de béton de granulats léger (BGL) [30].

Propriétés, caractéristiques particulières	Utilisation, domaine d'applications privilégiées
- Masse volumique réduite (entre 1000 et 1800 kg/m ³)	- Allègement des produits et des ouvrages.
- Bonne résistance mécanique	- Isolation thermique et phonique

I.2.3.1. Différents types de granulats légers

La différence entre les granulats légers et les autres granulats est leur faible densité, inférieure à 1200 kg/m³. On peut les distinguer en fonction de leur origine naturelle ou artificielle [31] :

➤ Granulats naturels

Les agrégats naturels légers peuvent donner une résistance du béton à une résistance moyenne, même s'ils sont largement utilisés [1].

Ce sont des matériaux minéraux naturels non préparé qui n'ont subi que de traitement mécanique tels que lavage, broyage et tamisage [32] [33].

Les principaux agrégats de cette catégorie sont les diatomées, la pierre ponce, les scories, les cendres volcaniques et le tuf. Sauf les diatomées, tout le reste est volcanique, [1].

En les concassant, on obtient des granulats légers [34].

La figure 1.4 montre quelques exemples d'agrégats naturels



Diatomite



Laitier volcanique



OPS



Pierreponce

Figure I.4. Différents granulats légers naturels [34].

➤ Granulats organiques

Les produits organiques, naturels ou artificiels, tels que le liège, les copeaux de bois, la balle de riz et le polystyrène expansé, utilisent des matériaux qui entrent dans le champ du recyclage des déchets, ce qui a un impact positif sur l'environnement et la contribution économique à ce type de granulats. L'élément (pesée) en polystyrène expansé entrant dans la composition du thème béton de nos travaux est un matériau poreux rigide et de faible densité dont l'utilisation principale est l'isolation thermique des bâtiments et des emballages industriels ou alimentaires. Les paillettes sont constituées de polystyrène cristallin ajouté lors du processus de dépolymérisation, agent d'expansion (pentane, C₅H₁₂)[35].

Le béton léger est obtenu en remplaçant totalement ou partiellement les granulats standards par des composés de faible poids (légers) pour obtenir une densité plus faible, la densité de ces matériaux varie de 400 à 1300 kg/m³ selon la classe granulométrique. Réduire le pourcentage de billes de polystyrène constituant des agrégats grossiers par rapport au mortier [36].

➤ Granulats artificiels

Les granulats légers peuvent également être produits artificiellement, en utilisant des matières premières naturelles, telles que l'argile et le schiste italiens. Dans certaines régions, il est fait de p, d'ardoise ou de matériaux spéciaux, tels que la boue et le laitier de charbon de Taiwan, les cendres volantes frittées et même le PSE (polystyrène expansé) et d'autres sous-

produits industriels, [34] qu'il s'agisse de végétaux (copeaux de bois) ou de fibres de cellulose, Ces agrégats ont généralement une variété de noms commerciaux, mais il est préférable de les classer en fonction des matières premières et des procédés de fabrication utilisés pour étendre l'échelle et réduire la densité apparente[1].

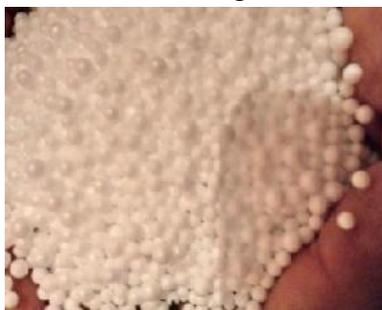
La figure 1.5 montre quelques exemples des granulats artificiels



Laitier expansé



Schiste expansé



EPS



Laitier refroidi à l'air

Figure I.5. Différents granulats légers artificiels [34].

Propriétés des bétons légers

La description des propriétés des bétons sera davantage axée sur les éléments suivants :

Les propriétés physiques

La masse volumique

La densité du béton est l'une des caractéristiques les plus importantes dans le cadre de cette recherche. Réduisez la densité c'est possible en changeant le type d'agrégat et en changeant le ratio des différents agrégats ingrédient. Comme le montre **la Figure 1.6**, l'effet du remplacement les agrégats naturels sont plus importants pour la densité du béton grâce aux agrégats légers l'orsqu'il est mélangé avec un agrégat de brique cassé [37].

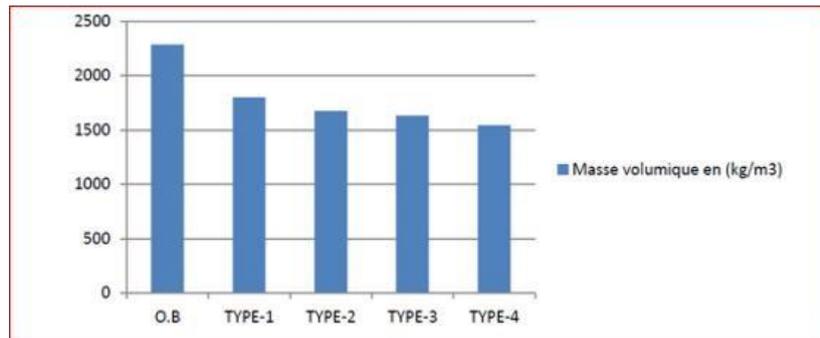


Figure I.6. Masses Volumiques des Bétons Durcis-en (kg/m^3)

Laprosité

Le béton se compose de plusieurs éléments solides (granulats, liants) et de plusieurs familles de lacunes varie en taille de dizaines d'angströms (\AA) à des dizaines de millimètres dépend de la source de ces pores [37]. En raison des pores internes, l'agrégat a une porosité inhérente particule. La taille caractéristique d'un capillaire donné (une dizaine de micromètres), la porosité de l'agrégat sera considérée comme une porosité microscopique [3].

Goumimelcha. A récupéré des granulats en recyclant des boues dans ses recherches. Le barrage a obtenu les résultats suivants : [4] (Figure 1.7)

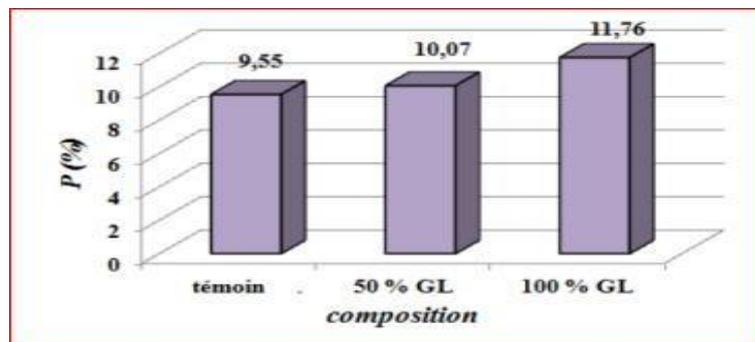


Figure I.7. Variation de la porosité en fonction de la composition de béton [4].

M. Zitouni et al. ont effectué des essais sur des bétons légers constitués de grains de billes de liège et de polystyrène comme agrégats légers. Une diminution de la porosité de bétons avec 25 et 50% de granulats légers par rapport au béton ordinaire, cette réduction est grâce aux billes de polystyrène expansé qui remplissent les pores du composite et ferment pour empêcher le passage de l'eau. En réparation, pour des dosages supérieurs à 50%, la porosité augmente. (Figure 1.8)

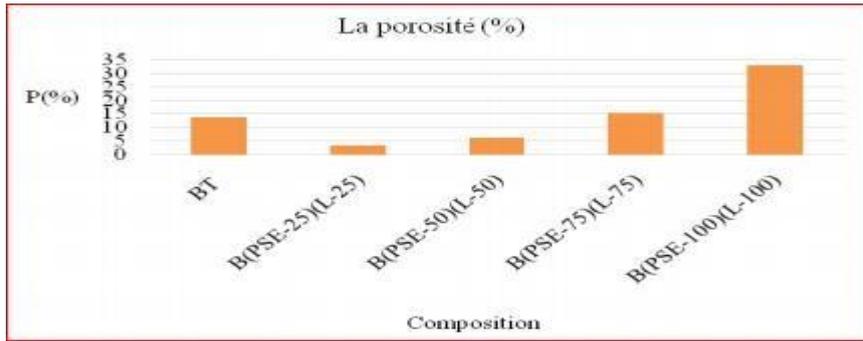


Figure I.8. Variation de la porosité en fonction de la composition de béton [39]

1.3.1.3. Légèreté

La première conséquence de l'utilisation d'agréments légers est une réduction de 20 à 30% de la densité du béton.

A titre de comparaison, la densité du béton la puissance hydraulique est d'environ 2300 kg/m³ alors qu'elle est d'environ 1600 kg/m³ pour un béton d'argile expansée, entre 600 et 900 kg/m³ pour le béton de bois et qu'il varie entre 350 et 650 kg/m³ pour béton cellulaire (norme NF P 14-306). L'intérêt est d'avoir un matériau facile à traiter lorsqu'il est vendu fabriqué sous forme de blocs de béton. De plus, ce matériau léger nécessite moins de fondations lors de la construction [40].

B. LAOUD (2013). Ont rapporté que l'influence de l'incorporation d'agréments de liège montre une réduction de 50% de la densité en fonction de la substitution (Figure 1.9).

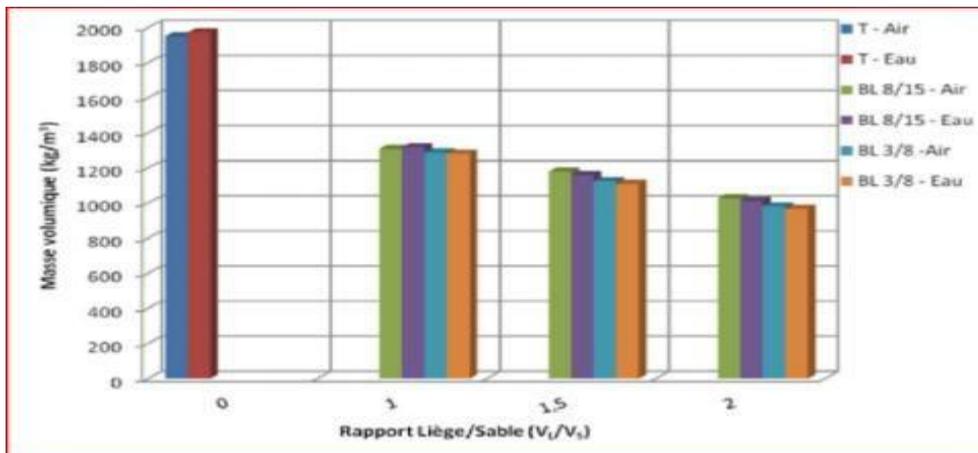


Figure I.9. Evolution de la masse volumique en fonction de dosage en liège [41].

La sensibilité à l'eau

Agréments, poreux et perméables, permettant des transferts sous forme liquide et sous forme de vapeur. Dans le cas de l'eau liquide, on parle d'absorption et dans le cas de l'eau vapeur, on parle de sorption-désorption. La perméabilité représente la capacité d'un matériau à permettre

au fluide de s'écouler à travers son sein, sous l'effet d'un gradient de pression. Cette propriété de perméabilité n'existe donc que si le matériau a une porosité importante et que celui-ci est lié. D'autre part, un matériau peut être très poreux (béton cellulaire) et peu perméable car les pores, non connectés entre eux, ne constituent pas des chemins continus, dans lesquels le fluide peut couler. La porosité et la perméabilité sont donc liées, mais la première ne s'applique pas nécessairement la deuxième [38].

Durabilité

Les conditions d'exposition conditionnent souvent la conception du béton. En effet, les cycles de gel-dégel en présence ou en l'absence de sels de fusion représentent un aspect critique de durabilité du béton léger exposé aux intempéries.

Il est important de distinguer entre les deux types d'attaque par le gel, avec ou sans sels de fusion, car les mécanismes de détérioration sont différents [18].

La rhéologie à l'état frais

Les propriétés rhéologiques du béton à l'état frais définissent la relation contrainte-déformation du matériau à haute température. Se référer à ses caractéristiques d'élasticité, de plasticité et de viscosité [3].

Les propriétés rhéologiques du béton à l'état frais sont fonction de l'énergie nécessaire à l'installation par rapport à la qualité de finition requise. Par conséquent, les paramètres qui doivent être conservés par rapport à la rhéologie du béton léger à l'état frais, les points suivants doivent être pris en compte lors de l'ajout de produits chimiques: méthode de formation et de placement, qualité de finition et taille granulat et coffrage[18].

Propriétés mécaniques

I.3.2.1. Résistance en compression

Dans toutes les contraintes mécaniques, la résistance du béton la recherche axiale est la plus importante, probablement parce qu'elle projette généralement des images la qualité globale du béton, car elle est directement liée à la structure du béton ciment hydraté. De plus, la résistance à la compression du béton est presque toujours constante Éléments clés dans la conception et la construction de structures en béton répondre aux spécifications[42].

La résistance à la compression caractéristique du béton est de 28 jours, f_{c28} . La résistance à la compression du béton est causée par écrasez-le en comprimant axialement un spécimen de cube d'une taille de $(10 \times 10 \times 10) \text{ cm}^3$. Chargez l'échantillon dans la machine jusqu'à ce qu'il se brise pour le test de compression, enregistrez la charge maximale atteinte et calculez la résistance à la compression[42].

Le niveau de performance du béton léger est inférieur au matériau la structure habituelle, car l'agrégat léger a sa propre porosité ϵ_g , Faites-le déformé. D'une manière générale, la résistance à la compression de 28 jours et lorsque la porosité ϵ_g de l'agrégat diminue, le module d'élasticité E augmente. Herihiri.O et al. En 2010 ont étudié les propriétés physiques et mécaniques du mortier à base de plâtre. La balle remplace tout ou partie du sable alluvial et dilate le polystyrène la quantité de polystyrène EPS, lorsque la teneur en EPS est de 100%, la qualité le volume est réduit de 60%, et la résistance est réduite de 48,12%, particulièrement adapté pour réparer les travaux et réduire le poids du bâtiment. (Figure I.14)[42].

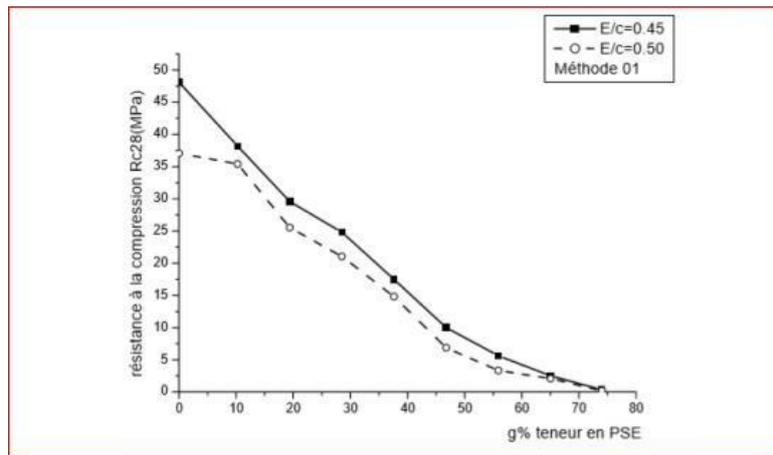


Figure I.10. Evolution de la résistance à la compression à 28j en fonction de la teneur en polystyrène pour E/C= 0.45&0.5[42].

Mohellebi.S (2014) a étudié la formulation de béton léger de la une partie de l'agrégat naturel est recouverte de la couche de céramique et/ou de marbre, selon la figure I.12, elle a observé par rapport au béton témoin, la résistance et la qualité sont 38% et 8,5%[42].

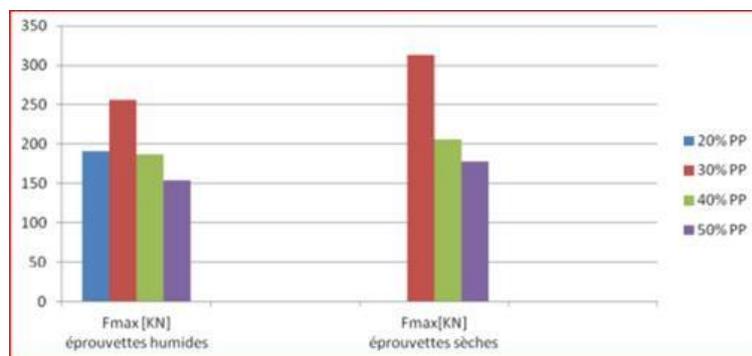


Figure I.11. Résultats des efforts maximaux de compression uni-axiale pour éprouvettes humides et sèches à base de billes non enrobées [42].

Comme le béton de densité ordinaire, la fumée de silice peut améliorer l'évolution et la force du béton léger. D'autres additifs peuvent également être incorporés dans le béton léger. Il est possible d'obtenir et d'utiliser béton traditionnel. Les progrès des connaissances et technologies spécifiques font au fil des ans, les performances du béton ont été améliorées, y compris celles du béton léger. Par exemple, en utilisant des additifs minéraux (fumée de silice, cendres volantes, scories) et adjuvants (Agent entraîneur d'air, AEA, super plastifiant, SP, agent réducteur d'eau, WR et le réglage de l'accélérateur) en particulier peut réduire le rapport E/L, tandis que maintenez une bonne maniabilité. Utilisez des doses élevées d'adhésifs et de plastifiante augmentation de la résistance du béton à base de polystyrène[43].

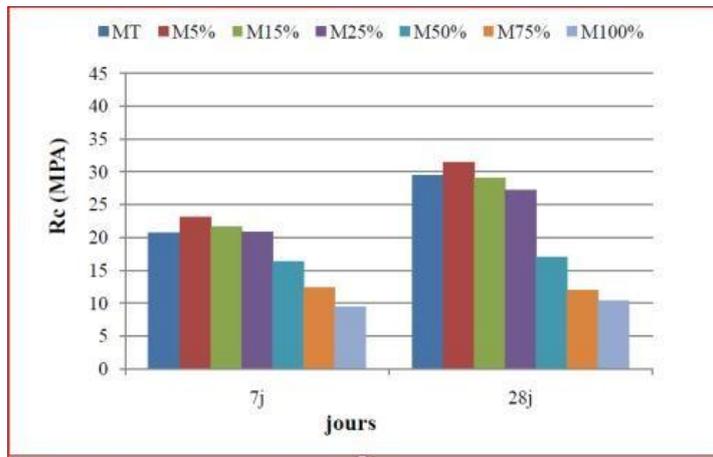


Figure I.12. Résistance à la compression (Mpa) en fonction des jours avec le dosage du ciment C= 500 kg et 1% plastifiant [43].

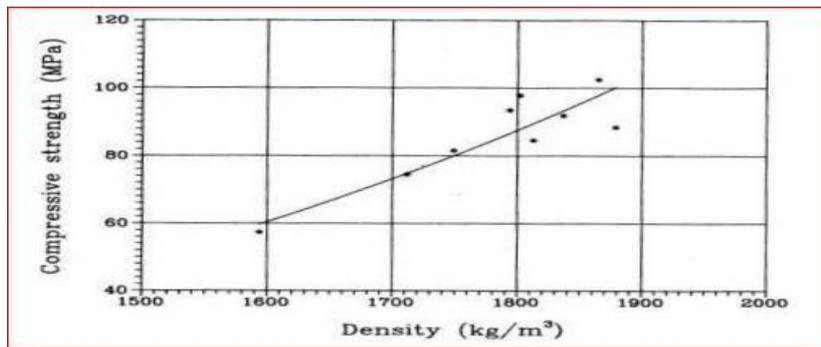


Figure I.13. La relation entre la résistance à la compression de 28 jours et la densité du béton de ciment. Mélange d'agréats légers [40].

La figure 1.13 montre clairement que la résistance à la compression varie avec l'augmentation de la densité du béton. En général, pour un béton de même résistance, la quantité de ciment doit être plus élevée que le béton de densité ordinaire [44].

Tableau I.3. Comparaison des résistances de bétons légers et classiques en fonction de leur dosage en ciment [17].

Résistance moyenne à la compression sur cylindre normalisé (MPa)	Dosage en ciment	
	Avec granulats fins légers (Kg /m ³)	Avec granulats fins de densité normale (kg /m ³)
17	240-300	240-300
21	260-330	250-330
28	310-390	290-390
34	370-450	360-450
41	440-500	420-500

I.3.4. Propriétés thermiques

L'une des propriétés intéressantes du béton léger est sa capacité d'isolation thermique. De nombreuses bulles d'air emprisonnées dans l'épaisseur du béton, forment une mousse qui permet d'avoir un matériau avec une bonne isolation thermique. Sa conductivité est de l'ordre de 0,20 w/m. °k, lorsque la densité est de 400 kg/m³, elle est de l'ordre de 0,30 w/m. °k, lorsque la densité est de 800 kg/m³ [45].

La demande d'isolation appropriée a considérablement augmenté. Les matériaux isolants sont économiquement rentables et les économies d'énergie sont devenues la principale préoccupation des architectes et constructeurs.

De plus, la conductivité thermique du béton de polystyrène léger est faible surtout pour des taux de perles très élevés (environ 70%). Par conséquent, il peut apporter des solutions techniques très intéressantes aux problèmes d'isolation thermique dans le bâtiment [45].

Les avantages et les inconvénients des bétons légers

Avantage

Le béton léger est utilisé pour plusieurs avantages, on peut les classer en trois catégories qui sont :

Avantages techniques

- ✓ Légèreté : plus léger qu'un béton classique, le béton léger a une densité de 0,4 à 1,2 en comparaison de 2,2 à 2,5 pour un béton classique.
- ✓ Isolant: Le béton léger a un pouvoir isolant thermique et phonique beaucoup plus important qu'un béton classique [9].
- ✓ Non inflammable: Le béton léger est classé M0 au test de réaction au feu à partir d'un certain dosage en ciment.

- ✓ Imputrescible : Le béton léger est un matériau à pH basique, constitué de ciment, de sables lavés et de perles de polystyrène expansé stabilisé.
- ✓ L'augmentation des propriétés d'isolation thermique et acoustique.
- ✓ Les excellentes qualités de finition d'une pièce en béton léger.

Avantages de la mise en œuvre

- ✓ Exécution simple et rapide : accessibilité sur chantier entre 24 et 48 h après coulage, selon l'épaisseur.
- ✓ Maniabilité : pompable sur de longues distances et de grandes hauteurs, il est facile à mettre en œuvre, notamment en forte épaisseur.
- ✓ Coffrages plus légers [9].
- ✓ Les pièces de béton léger sont aussi plus faciles à manipuler et à déplacer, en raison de leur relative légèreté (transport possible de pièces plus grandes).

Avantages Economiques

- ✓ Le béton léger, par sa légèreté, réduit le poids mort des bâtiments, ce qui réduit considérablement la dimension, donc le poids, des fondations [17].
- ✓ Économie sur le ferrailage des éléments.
- ✓ Une augmentation de la productivité sur le chantier en raison du faible poids du matériau [17].
- ✓ Le plus faible volume de béton utilisé, il est aussi possible d'économiser sur les quantités de ciment par rapport au béton ordinaire.

Inconvénients des bétons légers par rapport au béton ordinaire

- ✓ Le prix est plus élevé en raison de la plus grande quantité de ciment.
- ✓ Selon le béton léger sélectionné, le fournisseur est plus restreint.
- ✓ En raison de l'utilisation d'agrégats légers, le prix est plus élevé et le mélange de béton prend plus de temps.
- ✓ Installation délicate, car le béton est plus sensible.
- ✓ Difficile à installer avec pompe à béton.
- ✓ Haute consommation d'eau, agrégat à haute porosité.
- ✓ Le module élastique E est inférieur à celui du béton ordinaire.
- ✓ La résistance mécanique du béton léger est inférieure à celle du béton ordinaire.
- ✓ La mise en œuvre sur le chantier doit être plus délicate en raison de la fragilité du matériau, surtout pour les pièces de grandes dimensions.

Domaine d'utilisation des bétons légers

Le béton léger est un matériau composite constitué de différents éléments allégés, d'où son nom. Cette particularité permet une utilisation plus facile contrairement au béton lourd. Le béton léger est divisé en des domaines d'utilisation comme suit :

Isolants

Leur résistance est très faible, dans cette catégorie on peut citer : le béton poreux (cellulaire), ils sont utilisés dans la construction comme :

- ✓ Bloc de maçonnerie.
- ✓ Panneau préfabriqué.
- ✓ Mur anti-bruit.
- ✓ Ouvrage extérieur.
- ✓ Les pavés.

Isolant porteur

Leur masse volumique varie de 1000 à 1300 kg/m³ et leur résistance à la compression est de l'ordre de 15 à 20 MPa. Ces bétons peuvent être employés pour réaliser :

- ✓ Des murs banchés ou préfabriqués.
- ✓ Des blocs à maçonner.
- ✓ Blocs, hourdis, panneaux préfabriqués, bardage.
- ✓ Les planchers des constructions métalliques à grandes surfaces.
- ✓ La protection incendie.

Béton de structure

Ils ont une masse volumique de 1700 à 1800 kg/m³ et leur résistance caractéristique à la compression dépasse 20 MPa. Les granulats légers doivent répondre à un certain nombre de critères concernant le pourcentage de grains cassés, la masse volumique (en vrac ou des grains), le coefficient d'absorption d'eau, la résistance à la compression des grains, la composition chimique, la propreté, la granularité. Ces bétons sont utilisés pour :

- ✓ Ouvrage où le poids mort est important par rapport au poids total.
- ✓ Immeuble de grande hauteur.
- ✓ Portées importantes (poutres, voiles).
- ✓ Structures marines immeubles.
- ✓ Restauration d'anciens immeubles.
- ✓ Surélévation d'immeubles existants.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les dernières connaissances sur les propriétés physiques et mécaniques du béton léger, leurs classifications et leurs domaines d'utilisation. Nous avons parlé sur les problèmes liés aux choix des matériaux utilisés et des méthodes utilisées pour alléger le béton.

A la fin de ce chapitre nous avons terminé avec les avantages et les inconvénients de béton léger.

Chapitre II
Matériaux légers utilisé dans les
Mortiers et béton léger

Introduction

Le problème de la gestion des déchets solides est préoccupant, il concerne tous les pays du monde. Après avoir pris des engagements envers les pays touchés par le changement climatique et l'épuisement des ressources énergétiques, les politiques méditerranéennes et internationales de développement durable, la chine a adopté un plan visant à faire partie du système national de gestion des déchets solides pour la protection de l'environnement. L'objectif ultime de la gestion des déchets solides est de réduire le volume des déchets destinés à la décharge finale pour minimiser les risques de pollution qu'ils peuvent causer pour la santé et pour l'environnement. La gestion des déchets solides doit être guidée par les principes du développement durable : réduire, réutiliser, recycler, valoriser et éliminer.

Les déchets peuvent être transformés en granulats recyclés pour être utilisés, en remblais de diverses natures, en couches de forme sur les chantiers des travaux publics ou encore en d'autres applications dans le domaine de la construction, en particulier, comme granulats légers pour le béton. Ces granulats contribuent à diminuer les volumes de granulats en fin de vie des ouvrages grâce à l'optimisation des structures porteuses résultant de l'allègement de structures. Pouvant être aussi issus de sous-produits industriels, ils permettent de plus de préserver les ressources naturelles en granulats et constituent une filière de valorisation des sous- produits. Plusieurs travaux de recherche ont été réalisés, dont le but est de diminuer et valoriser ces déchets.

Déchet d'olives (lesgrignons)

Introduction

La culture de l'olivier peut avoir des impacts positifs et/ou négatifs sur l'environnement (air, eau, sol et animaux). L'implantation de l'olivier favorise l'oxygénation de l'air, la conservation de la fertilité du sol et lutte contre l'érosion, bien que les effets positifs soient nombreux, l'activité oléicole engendre des margines et des résidus nocifs pour la nature. L'industrie oléicole engendre, en plus de l'huile comme produit principal, de grandes quantités de sous-produits. Ainsi 100 kg d'olive produisent en moyenne 35 kg de grignon d'olive et 100 litre de margine [46]. En effet, le grignon d'olive produit lors du processus d'extraction de l'huile d'olive constitue une réelle menace pour l'environnement. Bien qu'il ait une variété d'utilisations, il peut être utilisé comme, alimentation animale ou source d'alimentation en carburant pour les chaudières, mais la plupart d'entre eux sont rejetés dans l'environnement et constituent un problème grave en raison de sa teneur en polyphénols nocifs. Composés non biodégradables. Cependant, en raison de ses propriétés

lignocellulosiques, le grignon d'olive sous forme de farine peut être utilisé comme charge dans les matériaux composites.

Définition

Les grignons ou résidus solides sont constitués de la pulpe, de noyaux et de tégument d'olive avec un niveau d'humidité qui oscille entre 25-40% et une teneur en gras d'environ 3-7%, selon le procédé d'extraction utilisé.



Figure II.14. Grignons d'olives

Types de grignons d'olive

Selon le traitement technologique utilisé, on définit les différents types de grignons comme suit :

- **Le grignon brut** : Il s'agit de la première extraction du résidu d'huile d'olive entière, et sa teneur en eau (24%) et en huile (9%) est relativement élevée, ce qui favorise sa dégradation rapide en milieu ouvert.
- **Le grignon épuisé** : c'est le résidu obtenu après déshuilage du grignon par un solvant qui est généralement l'hexane.
- **Le grignon partiellement dénoyauté** : il résulte de la séparation partielle du noyau de la pulpe, par tamisage ou par ventilation forcée.
- **Pulpe d'olive** : c'est la pâte obtenue lorsque le noyau a été préalablement séparé de la pulpe à l'extraction de l'huile. Elle est riche en eau (60 %) et de conservation très difficile.

Caractéristiques physiques

Le grignon d'olive est un type de déchet agricole, il peut être exploité dans différents domaines, biologies, génie civil, ils sont utilisés traditionnellement sous leurs différentes formes, qu'elles soient liquides ou solides. Le grignon d'olive représente le résidu solide des huileries après extraction de l'huile (généralement par pression après broyage d'olive, il

comporte la pellicule de fruits (Épicarpe), la pulpe (mésocarpe), la coque du noyau (endocarpe) [47].

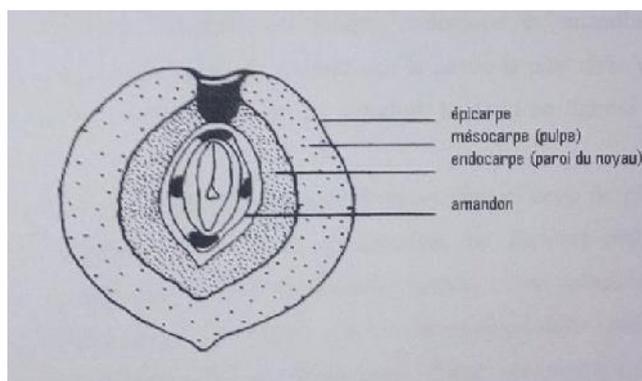


Figure II.15. Section transversale du grignon d'olive avec ses différentes parties [47].

Composition chimique de grignon

La composition chimique de grignon varie selon le stade de maturité des olives et le procédé d'extraction de l'huile. Cette composition peut se résumer comme suit :

- La teneur en cendres est normalement faible (3 à 5%). Les teneurs élevées rencontrées sont dues à l'absence de lavage et à la présence des olives ramassées.
- Les teneurs en matières azotées varient moins fortement et sont en moyenne de l'ordre de 10%.
- La teneur en matière grasse est relativement élevée et varie principalement selon le procédé technologique employé. L'épuisement de grignons permet d'avoir un produit dont la teneur oscille entre 3 et 4 % de la matière sèche. Ces matières grasses sont composées principalement d'acide oléique (84%), stéarique, palmitique, myristique et linoléique.
- La teneur en cellulose brute est élevée (32 à 47%).

Le tableau III.1 donne une indication sur cette composition.

Tableau II.4. Composition chimique indicative de grignons d'olives.

Matière Sèche (MS)	Matières Minérales (MM)	Matières Azotées Totales (MAT)	Cellulose brute (CB)	Matières Grasses (MG)
75	3-5%	% 5-10%	35-50%	8-15%

Le grignon comme ingrédient des matériaux de construction

Diverses méthodes de traitement ont été utilisées pour réduire l'impact environnemental des déchets d'olive, et certains efforts de recherche se sont concentrés sur l'extraction de l'hémicellulose (plus particulièrement du xylane), qui est ensuite utilisée dans l'océan. Dans le domaine pharmaceutique, du fait de sa grande résistance à la chaleur, d'autres travaux ont été menés pour extraire la lignine pour l'incorporer dans des polymères [48] [49]. Mais, peu de travaux de recherche ont été réalisés dans le domaine de la valorisation du grignon d'olive comme charge végétale dans les matériaux composites. L'avenir des bâtiments peut être lié au grignon d'olive. En fait, la réutilisation du grignon d'olive comme matière première dans le secteur de la construction peut non seulement réduire le gaspillage d'huile d'olive de l'industrie, mais également compenser le coût des matières premières. C'est aussi une manière écologique et durable de recycler les déchets tout en préservant les ressources naturelles.

Traitement de la farine de grignon d'olive

La méthode de modification diffère par l'adhérence entre le substrat et la fibre. Les fibres peuvent être modifiées physiquement ou chimiquement. Les méthodes physiques provoquent des changements dans la structure et les propriétés de surface des fibres ou substrats de cellulose [50]. On peut citer entre autres:

- L'irradiation par Ultra-violet.
- Les traitements par décharges électriques (corona, plasmafroid).
- Le traitement par irradiation lumineuse.

Les modifications chimiques comprennent des traitements avec de la soude, du silane, de l'acide acétique, ou encore des molécules à base de benzoyl, d'isocyanate, de triazine ou d'imidazolidinone. Ces méthodes ont pour but de rendre compatible la fibre et la matrice, par introduction d'un agent modifiant ou un agent comptabilisant qui permet l'association des fibres cellulosiques [51]. Ces traitements sont très efficaces, et moins chers et leur mise en œuvre ne nécessite pas l'acquisition de dispositifs industriels. En effet leur mise en œuvre est très facile, ainsi ils ont fait objet de plusieurs articles de synthèses.

Différentes filières de valorisation des grignons d'olives

Les données de la littérature qui décrivent toutes les possibilités de valorisation des grignons sont nombreuses, la figure 3 reprend toutes ces filières.

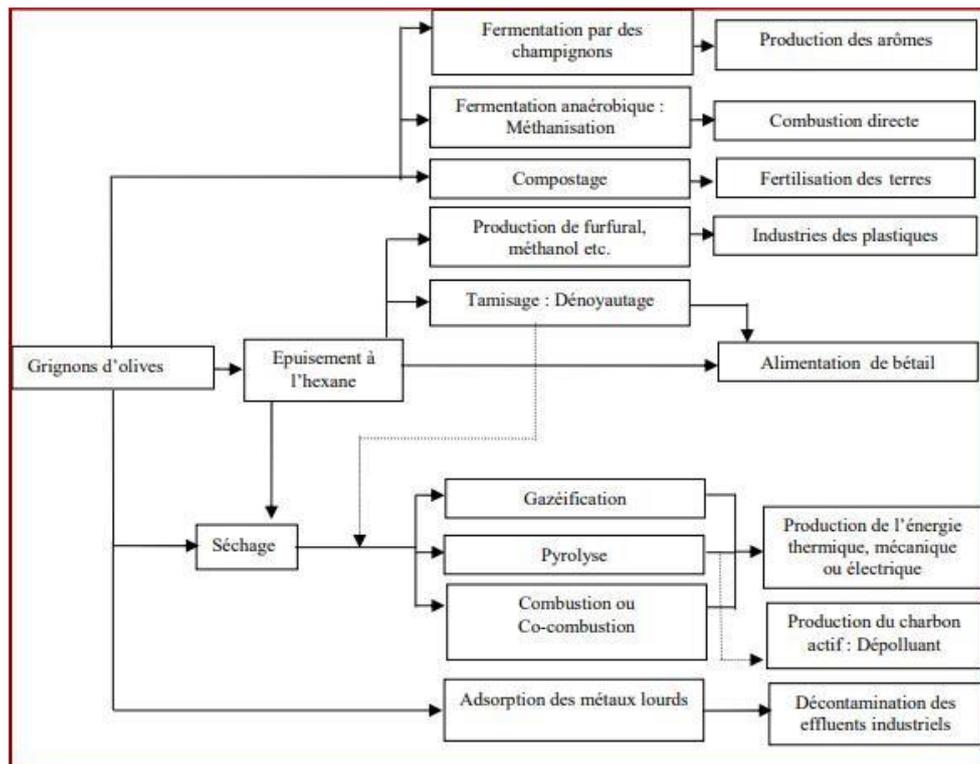


Figure II.16. Différentes filières de valorisation des grignons d'olives

II.2.8. Conclusion

L'usage du grignon d'olive et du foin dans la construction constitue une percée intéressante à plusieurs points de vue. Il s'inscrit dans une démarche de développement durable et il présente l'avantage d'utiliser une matière première renouvelable contrairement aux granulats des carrières dont les ressources s'appauvrissent. La réutilisation des grignons d'olive en tant que matière première dans l'industrie du bâtiment, permet non seulement de réduire les déchets issus de l'industrie oléicole, mais aussi de compenser le coût des matières premières. Il s'agit également d'un moyen écologique et durable de valoriser les déchets tout en préservant les ressources naturelles. Grâce au caractère lignon-cellulosique les grignons d'olive sous forme de farine, ils pourraient trouver une application comme charge dans les bio composites. Cependant, les mélanges polymères charge cellulosique, conduisent souvent à des matériaux composites fragiles et très peu performant en raison du manque de compatibilité entre les deux composites.

Coques de noix de palmier

Introduction

L'utilisation de résidus agricoles dans le béton devient une option de plus en plus faible pour résoudre les problèmes environnementaux actuels. En outre, certains de ces déchets solides peuvent être utilisés dans le béton léger, ce qui peut réduire considérablement l'utilisation de

la charge statique du bâtiment. C'est alors que de nouveaux axes de recherches sont explorés pour proposer des bétons capables de résoudre les problèmes économiques, techniques et environnementaux dans le domaine de la construction. Parmi ces résidus figurent les coques de noix de palme qui sont des dérivées du palmier à huile, un arbre ayant une valeur économique appréciable, originaire de l'Afrique occidentale et répandue partout dans le tropique depuis plusieurs années ces coques sont incorporées dans le béton dans lequel ils remplacent partiellement ou totalement les gros agrégats.

Origine ethistorique

Les palmiers sont connus avec quasi-certitude depuis la fin de jurassique. Adanson fut le premier, en 1750, décrit le palmier à huile, il le nomma Palmiste et le rattacha au genre « Cocos ». Cet élégant palmier, originaire d'Afrique intertropicale humide, est un lointain parent du cocotier. Ensuite JACQUIN Vînt, auteur de son nom scientifique actuel, qui, en 1763 l'observait aux Antilles, il a pu mettre au point la description exacte de cette plante. Elaeis vient du mot grec « elaïa » qui signifie olive, en raison de ses fruits riches en huile et guineensis rappelle que la plante avait été importée de Guinée à la Martinique. Son foyer d'origine semble se situer le long du golfe de Guinée.

Aujourd'hui, les palmeraies « naturelles » ont souvent des origines quasi naturelles. Dans cette dispersion naturelle ou sous-naturelle, une plus grande superficie de plantation a été augmentée [52][53].

Définition

Les coques de noix de palme étudiées, sont les enveloppes des graines de palmistes. Elles sont obtenues après extraction des fibres et concassage du noyau [54].



Figure II.17. Coques de noix de palme décortiquées

Les propriétés physico-mécaniques des CNP en tant qu'agrégats

Des recherches sur les coques de noix de palme ont été faites, et si nous voulons conserver des résumés de différents travaux, nous pouvons citer [55].

Par conséquent, nous pouvons déterminer les propriétés physiques et mécaniques des CNP suivants :

- Le poids spécifique est compris entre 1,17 kN/m³ (Mannan MA G. C., 2001) et 1,62 kN/m³ (PN,2006).
- L'épaisseur des coques est comprise entre 0,15 et 8 mm ; leur texture est lisse sur les faces concave et convexe, et rugueuse et épineuse sur les parties cassées.
- La densité des coques meubles varie entre 500 et 600kg/m³ et celle des coques compactées varie entre 600 et 740kg/m³.
- L'absorption en eau varie respectivement de 8-15% et 21-25% après 1h et 24h.
- La teneur en humidité varie de 8 à 15%, ce qui est similaire aux coques de noix de coco.
- L'essai Los Angeles donne une valeur de résistance à l'usure de 3 à 8%.

Propriétés physico-mécaniques du béton de CNP

Bien que différents chercheurs aient des valeurs différentes, le processus évolutif est toujours le même. Notez, par exemple, lorsque le pourcentage de substitution augmente, les propriétés physiques et mécaniques du béton CNP diminuent selon l'U [55]. Cependant, dans tous les cas, la substitution par volume semble meilleure que la substitution par la qualité. Ainsi, afin de pallier cette perte de résistance et de durabilité, de nombreuses personnes ont proposé une méthode de traitement de la coque à la chaux [56] ou à la cendre volante [55]. Afin de mieux comprendre les propriétés du béton CNP, nous pouvons énumérer les caractéristiques suivantes : [55]

- L'affaissement augmente avec la croissance d'E/C : pour un ratio de ciment sur ciment, de sable sur ciment et de CNP sur ciment égal à 1 : 1 : 2, on a respectivement 30 mm et 63 mm d'affaissement pour des rapports E/C de 0,5 et 0,6.
- La densité du béton durci doit être inférieure à 2000Kg/m³.
- Pour un rapport E/C de 0,4, on obtient une résistance à la compression de 20MPa à 28 jours.
- L'ajout de fumée de silice l'améliore à 37MPa.
- On retient trois valeurs de référence pour le module d'élasticité : 5,31GPa, 10,90 et 16,1GPa avec amélioration aux fibres d'acier.
- Le module d'élasticité dynamique est lié au module d'élasticité statique par la formule suivante: $E_d = 0,3(E_s)^{1,25}$.
- La conductivité thermique du béton de CNP est de 0,45 W.m⁻¹.°C⁻¹.



Figure II.18. Eprouvettes de béton de CNP écrasées à 90 jours

Tableau II.5. Caractéristiques physiques des coques de noix de palme (CNP)

Caractéristiques	CNP
Granularité	2-8 mm
Densité apparente	560 kg /m ³
Densité spécifique	1340 kg/m ³
Teneur en humidité	4,35 %
Absorption d'eau (% à 24h)	22,25%

➤ Capacité d'absorption des CNP

D'après les travaux de Yasmine TRAORE, Adamah MESSAN, François TSOBNANG1, Jean GERARD, la mesure de la capacité d'absorption (C_{ab}) consiste à tremper 200g de chaque échantillon dans de l'eau et à mesurer la teneur en eau au bout de 24 heures. Les premiers résultats (tableau II.3), nous indiquent une réduction de la capacité d'absorption d'eau pour les CNP traitées à la chaux et au PVA. Le dépôt dû aux différents traitements a donc limité l'absorption de l'eau par les coques. Le traitement au silicate de sodium ne réduit pas significativement la capacité d'absorption d'eau des coques, ce qui laisserait penser que le dépôt occasionné pendant le traitement se serait dissous au cours de l'essai. Contrairement aux autres traitements, une augmentation de la capacité d'absorption est enregistrée avec le traitement thermique [56].

Tableau II.6. Capacité d'absorption d'eau en 24 heures des CNP avant et après traitements

Traitement effectué	C_{ab} (%)	C_{ab} corrigé (%)	Ecart type
Aucun	22,25	22,25	0,44
Chaux	20,35	20,38	0,02
Thermique	23,50	22,27	0,51
Silicate	22,10	22,22	0,29
PVA	18,06	18,44	0,38

➤ Résistance à la compression

D'après les essais de Yasmine TRAORE, Adamah MESSAN, François TSOBNANG1, Jean GERARD trois échantillons ont été testés pour chaque essai de résistance à la compression, trois échantillons ont été testés. La valeur moyenne des résistances obtenues pour chaque mélange après 7, 14 et 28 jours de maturité ont été mesurées et sont consignées dans le tableau II.4 [56].

Tableau II.7. Résistance mécanique à la compression

Désignation	Résistance à la compression et Ecart-type					
	7 jours		14 jours		28 jours	
Gravier	28,1	1,1	33,9	0,9	36,8	0,8
CNP nature	20,9	1,1	22,7	0,9	26,3	0,8
CNP chaux	27,6	1,3	28,5	1,3	28,9	2,5
CNP thermique	19,4	1,3	21,7	1,4	22,6	1,4
CNP silicate	20,3	2,1	22,7	2,9	26,1	1,8
CNP PVA	21,1	2,9	25,6	2,9	25,7	2,9

Conclusion

Pour conclure, nous pouvons considérer les CNP comme un matériau recyclable dans la mise en œuvre du béton. En effet, même si celles-ci n'ont pas exactement le même comportement que les agrégats conventionnels, elles peuvent cependant remplir les normes pour une bonne mise en œuvre. Il est donc important de chercher à améliorer leurs propriétés afin d'avoir un béton de meilleure performance. L'utilisation des CNP comme granulats entraîne une perte de maniabilité du béton par rapport au béton de granulats ordinaires. Les expérimentations nous montrent qu'un traitement des CNP au PVA permet d'améliorer cette maniabilité du béton en empêchant l'absorption de l'eau de gâchage par les coques pendant le mélange.

Lepolystyrène

Introduction

Le polystyrène est un matériau largement utilisé dans différentes utilisations et domaines à travers le monde. En conséquence, une grande quantité de polystyrène est générée. Les États Unis produisent environ 3,5 millions de tonnes sous forme de plastiques et environ 1 million de tonnes d'élastomères par an. Tous les produits élastomères à base de styrène sont des copolymères ou des mélanges de polymères. Seul un tiers du polystyrène sous forme plastique est constitué d'homopolystyrène. Il peut être utilisé dans de nombreux domaines, y compris les emballages, les plastifiants, les résines, les contenants, les fenêtres, les diffuseurs de

lumière et les industries d'appareils électriques. Ou bien injecté pour produire un grand nombre de produits (tasses, ustensiles de cuisine, poignées de peigne, jouets, etc.) et peut également être utilisé pour produire des bobines, des rayons inversés et des emballages. Cependant, il existe un certain nombre de qualités de mousse de polystyrène qui sont produites pour des utilisations spécifiques. Nous avons du polystyrène à usage général, du polystyrène résistant à la chaleur, du polystyrène durci et du polystyrène expansé final. Ils sont très courants.

Définition de polystyrène

Le polystyrène est un matériau poreux rigide de faible densité dont la fonction principale est l'isolation thermique des bâtiments et des emballages d'industries ou alimentaires [57]. Le polystyrène est généralement inflammable. La dégradation commence à 350° C et l'auto-inflammation autour de 490 ° C. Avec une densité réelle de 1,03 à 1,05, le polystyrène est soluble dans les hydrocarbures chlorés et aromatiques.



Figure II.19. Polystyrène sous sa forme commerciale

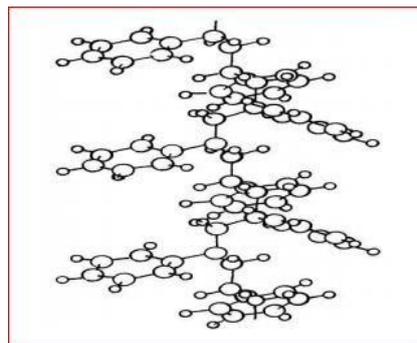


Figure II.20. Modèle pelote bâtonnet de polystyrène

Composition chimique

Sa formule chimique est $(C_8H_8)_n$. Il ne contient que du carbone et de l'hydrogène comme éléments chimiques.

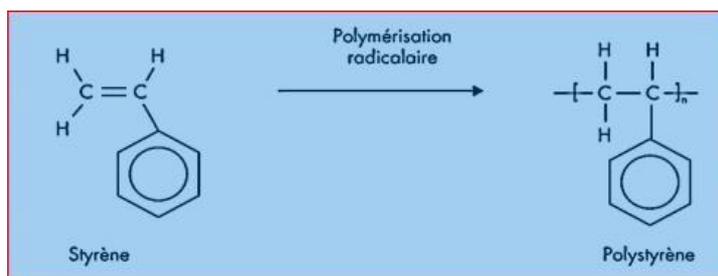


Figure II.21. Polymérisation du monomère de styrène en polystyrène [58].

Structurellement, il s'agit d'un hydrocarbure à longue chaîne avec des groupes phényle liés à certains atomes de carbone. Le produit de base utilisé pour préparer le polystyrène expansé est obtenu sous forme de petites particules blanches, qui est chimiquement très stable et possède des propriétés thermoplastiques. Le polystyrène est un polymère thermoplastique à squelette aliphatique linéaire, qui peut être obtenu en polymérisant des unités d'homopolymère de styrène (**Figure II.9**). Selon les différentes applications, les trois types diffèrent par la granulométrie et les propriétés :

- Celles utilisées dans la production actuelle, pour remodeler les particules sphériques du (porogène) :pentane.
- Ceux destinés à la fabrication de produit difficilement inflammable ou auto-extinguibles.
- Ceux destinés à la fabrication de produit expansé résistant aux essences et huiles minérales exemptes d'hydrocarbures aromatiques [59].

La fabrication du polystyrène expansé

Le polystyrène brut est un matériau plus ou moins lourd qui se présente sous forme de perles. L'expansion de ces perles est réalisée en trois phases : la polymérisation, le pré expansion et le moulage.

La polymérisation du styrène additionnée d'agent porogène

La polymérisation est une réaction chimique qui permet d'associer plusieurs molécules identiques pour former une molécule plus importante. Le styrène est une molécule associant uniquement carbone et hydrogène. Il est issu du pétrole et est produit industriellement. Mais on le trouve aussi à l'état naturel dans certains aliments (fraises, haricots, noix, bière,). Les granules de polystyrène expansibles sont obtenus par polymérisation du styrène. Ils sont imprégnés d'un gaz, le pentane, qui servira ensuite à l'expansion [60].

Les granules de polystyrène sont introduits dans une cuve en inox. On injecte ensuite de la vapeur d'eau qui, en dilatant le pentane, va provoquer une première expansion (jusqu'à 30 fois

leur volume initial). Une fois pré expansés, les billes reposent dans des silos pendant plusieurs heures pour permettre leur séchage : c'est la maturation [60].

Lemoulage

Les billes pré expansées sont introduites dans un moule fermé et sont soumises à une nouvelle injection de vapeur d'eau sous pression. Elles reprennent leur expansion, occupent tout l'espace du moule et se soudent entre elles pour constituer l'emballage.

La quantité de billes introduites dans le moule détermine la densité finale du produit.

Le polystyrène comporte trois niveaux de structure :

- Un agglomérat de billes soudées entre elles.
- Des billes composées de cellules.
- Des cellules contenant un gaz (air et résidus de porogène).

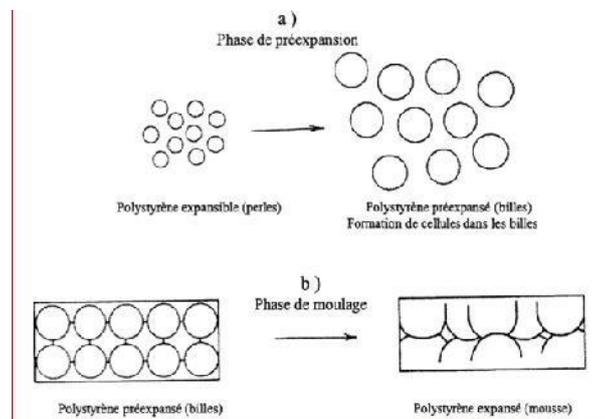


Figure II.22. Phases de pré expansion et de moulage du P. S.E

Polystyrène expansé (PSE) : est un matériau alvéolaire rigide, peu dense, dont les principales utilisations sont l'isolation thermique des bâtiments et l'emballage des produits industriels ou alimentaires. (Figure II.10),



Figure II.23. Polystyrène expansé (PSE)

Il existe deux types de polystyrène expansé :

- **Le polystyrène expansé moulé (PSE-M)** : est obtenu à partir d'un polystyrène cristallin auquel on a ajouté en cours de polymérisation, un agent d'expansion (le pentane, C_5H_{12}). **(Figure II.6).**
- **Le polystyrène expansé extrudé (PSE-E) ou XPS** : est quant à lui obtenu lors de l'extrusion par injection sous pression d'un gaz d'expansion (le pentane) dans le polymère cristallin fondu. **(Figure II.7)**



Figure II.24. Polystyrène expansé moulé (PSE-M)



Figure II.25. Polystyrène expansé extrudé (PSE-X)

Propriétés du polystyrène

Densité

La densité du polystyrène à l'état brut avoisine les 1000 kg/m^3 (Rapport du laboratoire de contrôle technique et d'expertise, Alger, 1998). Cette densité chute considérablement lorsque le polystyrène est expansé, elle est comprise entre 8 et 80 kg/m^3 [61]. Il faut noter que cette différence remarquable est due à la présence de l'air dans le polystyrène expansé. Le volume de polymère reste toujours très faible devant le volume d'air.

Résistance à la chaleur

Le polystyrène expansé se ramollit à une température de 90°C .

Absorption

Le polystyrène est un matériau de faible absorption, elle est de $0,2$ à 1 g par 100 cm^3 (Rapport du laboratoire de contrôle technique et d'expertise, 1998) [61].

Conductivité thermique

Le polystyrène est un matériau très réputé par ses performances thermiques, il est très utilisé dans l'isolation thermique des constructions sous forme de panneaux de 5 cm d'épaisseur

entreposés entre deux cloisons. La conductivité thermique du polystyrène dépend de sa porosité, elle-même dépendante du procédé d'expansion. En générale elle varie entre 0,027 à 0.037 W.m⁻¹.K⁻¹. Ces valeurs sont considérées parmi les valeurs les plus faibles de la conductivité thermique des matériaux [61].

Résistance à la compression

La résistance à la compression du polystyrène dépend essentiellement de sa densité, plus il est dense plus sa résistance est grande, mais à cause de sa flexibilité le polystyrène se comporte d'une manière assez complexe.

La masse volumique

Le béton léger réalisé à l'aide du polystyrène expansé (PSE) donne l'avantage d'avoir toute une panoplie de densités allant de 500 kg/m³ à 2200 kg/m³ [62].

Ladurabilité

Les billes de polystyrène sont parfaitement sphériques. La coupe d'une bille révèle une structure alvéolaire et une enveloppe constituée de deux membranes. Ceci explique d'une part son extrême légèreté et d'autre part sa totale imperméabilité à l'eau. En effet, des essais réalisés par Yamura et al. (Yamura et Yamauchi, 1982) ont montré que des billes de polystyrène immergées dans l'eau pendant un mois n'ont pas absorbé d'eau. Enfin, ces billes sont hydrophobes et présentent des charges électrostatiques en surface [62].

Résistance à la compression

La résistance à la compression des bétons de polystyrène est en fonction du dosage en granulats de polystyrène et de leurs tailles. Celle-ci peut être améliorée par des ajouts tels que la fumée de silice. Généralement, la résistance à la compression varie entre 0,2 et 23 MPa [61].

Comportement mécanique du béton à base de polystyrène

Bien que technologiquement très prometteurs, les bétons de polystyrène présentent néanmoins de nombreux problèmes pour comprendre leurs propriétés mécaniques. Chafi a travaillé sur du béton à base de fibres de polystyrène expansé d'une densité comprise entre 1,1 et 2,2. Les résultats ont montré que la résistance à la compression de ce type de béton diminue significativement avec l'augmentation de la fibre. Par exemple, le béton avec une densité de 0,1 résistera à environ 1/10 du béton avec une densité de 0,2 (**Figure II.13**).

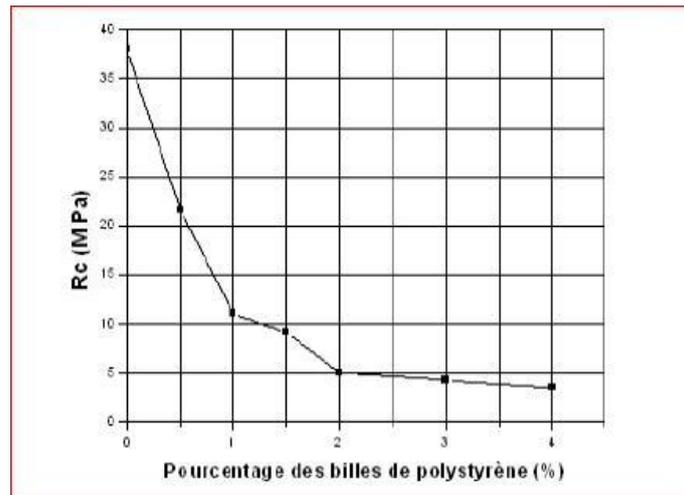


Figure II.26. Evolution de la résistance à la compression en fonction du pourcentage des billes de polystyrène [63].

De plus, un comportement complètement différent est observé vis-à-vis des charges de compression et de flexion. Si un béton de densité 1,3 a une résistance à la compression de seulement 1/10 de celle d'un béton de densité 2,2, il a une résistance à la flexion de 4/10 (**Figure II.7**). C'est quatre fois plus. On peut voir que l'ajout de polystyrène au béton a moins d'influence sur la résistance à la flexion que la résistance à la compression.

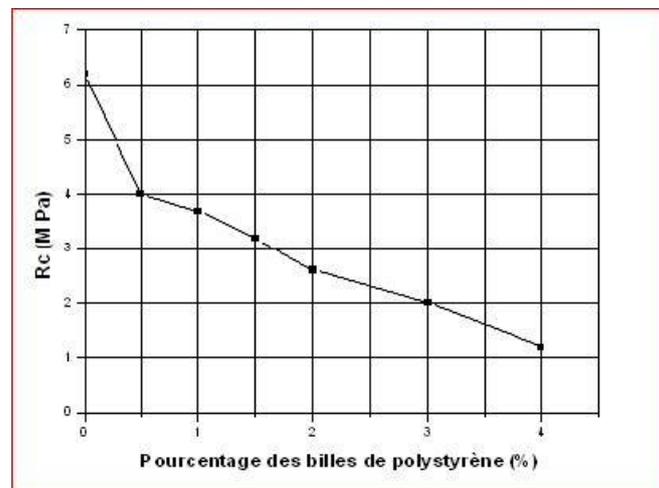


Figure II.27. Evolution de la résistance en flexion en fonction du pourcentage des billes de polystyrène [63].

Avantages d'utilisation du béton légers à base de polystyrène

Le béton de polystyrène est très utilisé, il présente beaucoup d'avantages sur le plan technique et économique.

Il est ultra léger avec sa faible absorption d'eau, il est très économique.

- Possède les meilleures performances thermiques et phoniques, le béton de polystyrène est durable[61].
- Permet une économie d'énergie dans l'habitat domestique, les pertitions d'énergie sont évaluées à 43% de la consommation énergétique totale.
- Il offre un espace sec et confortable : il élimine l'humidité qui peut se condenser sur les murs

Leliège

Introduction

Le liège est un matériau naturel, issu de divers chênes-lièges, après avoir été enlevé une fois par an, il reconstruit son écorce. Selon l'âge que l'écorce elle-même a acquis, l'épaisseur du liège produit par l'arbre est de 1 à 10 mm. La croissance annuelle de chaque année est séparée de l'année précédente par une ligne brune clairement définie. D'un point de vue thermique et acoustique, le liège est un très mauvais conducteur. Son utilisation la plus ancienne comme isotherme remonte à l'ancienne fabrication de ruches. En ce qui concerne sa position dans le bâtiment, nous avons trouvé des traces des peuples primitifs d'Afrique du Nord qui étaient à l'origine utilisés comme matériaux d'isolation, ces peuples primitifs l'utilisaient dans la dalle et la mélangeaient à de l'argile pour construire les murs de la maison résidentiel. L'habitat naturel du chêne-liège est la périphérie du bassin méditerranéen occidental (existant depuis plus de 60 millions d'années). La superficie naturelle des forêts de résineux dans le monde est d'environ 2 687 000 hectares, principalement répartis dans sept pays. Les principales forêts de résineux algériens sont principalement situées dans les zones semi-humides du nord, entre les frontières d'Alger et de la Tunisie, s'étendant de la mer jusqu'à une altitude de 1200 m[64].



Figure II.28. Distribution du chêne liège dans le bassin méditerranéen

Définition deliège

Le liège est un produit agricole, un matériau présent dans certaines écorces, en particulier l'écorce de chêne-liège. Il peut protéger l'arbre des insectes, du froid et des intempéries, et il

peut respirer à travers les pores (les trous de liège et certains fruits). Le chêne-liège est un puits de carbone, car il est utilisé pour produire du liège, il est donc plus efficace.



Figure II.29. Récupération du Liège

Structure du liège

Le liège révèle une structure alvéolaire identique à celle d'un nid d'abeille avec une absence d'espaces intercellulaires (**Figure II.17**). Cette structure cellulaire contient entre 30 et 43 millions de cellules. Le tissu subéreux contient 89,7% de matière gazeuse [66]. Malgré l'orientation aléatoire des parois cellulaires latérales (parallèles à la direction radiale), le liège est considéré comme un matériau transversalement isotrope.

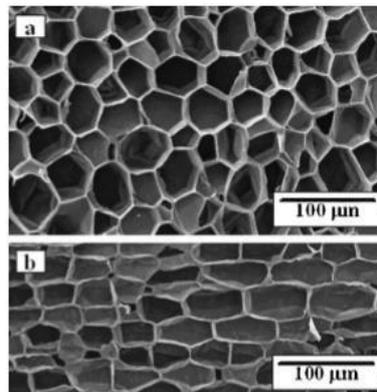


Figure II.30. Structure cellulaire du liège

Composition chimique du liège

Des travaux effectués sur la composition chimique du liège ont trouvé que les constituants de ce matériau dépendent de plusieurs facteurs tels que : l'origine géographique et génétique, le climat, le sol, les conditions de croissance, l'âge et les dimensions de l'arbre. Donc, cette composition diffère d'un arbre à un autre ; mais aussi dans le même arbre, entre le bas et le haut. Cette composition dépend aussi du nombre d'extraction du liège, puisque son arrangement s'améliore en fonction de ce même paramètre [67].

Le Tableau II.5 représente le classement des différents constituants du liège avec un ordre décroissant par rapport à leur participation massique.

Tableau II.8. Pourcentages massiques des différents constituants du liège [68].

Constituants (%)	Liège naturel
Subérine	45-46
Lignine	24-25
Polysaccharides	10-12
Extractibles	8-10
Cendres	3-5
Cires	5-6
Tannins	3-5
Autres	2-3

Préparation du liège

Elle comporte essentiellement les opérations suivantes :

Ecorçage ou démasclage

Le cycle d'exploitation du chêne liège commence tout d'abord par l'écorçage. Une première étape de sélection du produit initial est effectuée dans les subéraies.

Triage et séchage

Les planches de liège sont empilées à l'air libre pendant 6 à 12 mois afin de permettre au liège de s'affiner par oxydation.

Bouillage

Cette étape s'effectue pendant 45 à 90 minutes dans de l'eau. Ce nettoyage permet d'éliminer une partie des substances hydrosolubles du liège, d'augmenter son épaisseur, de réduire sa densité et d'améliorer sa souplesse.

Stabilisation

Cette opération permet aux planches de s'aplanir, le liège sec pour atteindre la consistance permettant la découpe.

Deuxième bouillage

Le liège subit un tri, les planches qui ne correspondent pas au calibre et à la qualité souhaitée sont éliminées, les autres planches sont bouillies une seconde fois, pendant environ 30 minutes, pour les rendre malléables.

Classement

C'est la répartition des planches de liège selon leur épaisseur et leur choix [64].

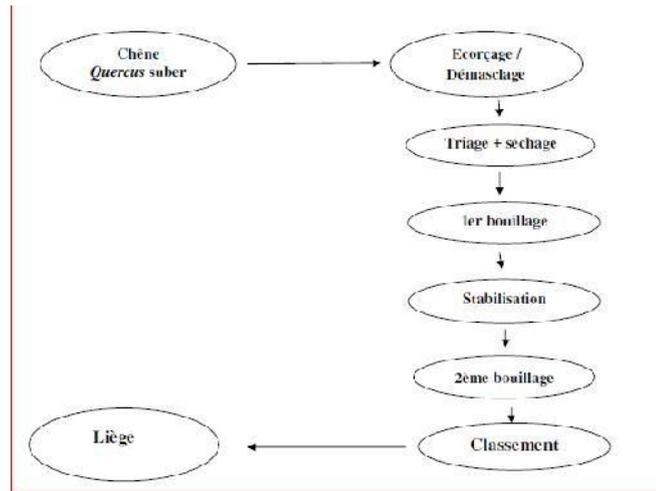


Figure II.31. Le cycle de production du liège

Différents usages du liège [69].

L'utilisation du liège est très courante dans toutes les régions. Il est considéré comme l'une des matières premières les plus importantes de la vie moderne. En plus des bouchons en liège et des matériaux isolants, le liège est également utilisé dans d'autres domaines:

- Dans le bâtiment (revêtement, isolation thermique et acoustique,).
- La construction navale (gaines de ventilation).
- La confection de la chaussure (talon et semelles) et dans l'emballage (granulé et laine de liège).
- L'industrie des chambres froides et transports frigorifiques.
- La mécanique (joints d'étanchéité, joints palier transmission).
- Les produits pharmaceutiques (bouchage et conditionnement de produit).

Béton de liège

Nous présentons ci-dessous une synthèse de quelques travaux de recherche qui ont abordé le sujet du béton de liège.

- (Moreira A et al., 2014), ont étudié différentes caractéristiques des chapes à base de granulats de liège (ciment, sable, liège et de l'eau). Ils ont trouvé que l'addition du liège affecte les propriétés des chapes par une diminution de la masse volumique, de la résistance à la compression et de la conductivité thermique. [70]
- (Chadi Maalouf et al., 2015), ce travail porte sur les mortiers de liège. Les auteurs ont expérimenté deux doses de substitution en liège, 50% et 75% par rapport au sable. La conclusion révélée de cette étude est que la composition de 75% a permis

la réduction de la consommation d'énergie de 29% en comparant avec la consommation d'énergie des briques creuses [71].

- (Ziregue A et al., 2016), ont étudié un béton à base des chutes de granulats de liège provenant de la fabrication des panneaux d'isolation. Ils ont trouvé qu'il existe un effet significatif de l'ajout des granulats de liège sur la diminution de la densité du béton et sur l'amélioration de l'isolation thermique ainsi que sur la diminution des performances mécaniques [72].
- (Boussetoua H et al., 2017), ont trouvé que l'augmentation de la quantité du liège dans un béton (liège, sable, ciment et eau) a tendance à diminuer la densité et à réduire la conductivité thermique et les propriétés mécaniques. Ils ont conclu qu'un béton de liège peut être utilisé comme un isolant thermique ou comme un matériau structurel selon sa teneur en liège [73].

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons introduit des notions générales sur les matériaux utilisés comme granulats légers, à savoir les grignons d'olive, les coques de noix de palme, le polystyrène et le liège. Nous avons présenté les définitions et les caractéristiques physico-chimiques, ainsi que de leur comportement mécanique. A la fin, nous avons identifié une synthèse de quelques travaux de recherche qui ont abordé le sujet des bétons légers.

Chapitre III

Etude bibliographique sur les mortiers légers

III. Etude bibliographique sur les mortiers légers

En 7 février 2020, une étude réalisée par Maelson M. Souzaa, Marcos A.S. Anjosa, Maria V.V.A. Saa, Nathaly S.L. Souzaa, sur le thème : Développement et classification d'agrégats légers à partir de boues d'épuration et de cendres de balle de riz, dans cette recherche, les boues d'épuration (SS) et les cendres de balle de riz (RHA) ont été utilisées comme matières premières au lieu de l'argile pour produire diverses variétés d'agrégats légers (LWA). Cette solution peut aider à préserver les ressources naturelles et à réduire les impacts environnementaux causés par les SS et les RHA. Des études antérieures ont démontré la faisabilité de l'application de SS ou de RHA pour produire des LWA, mais l'utilisation conjointe des deux résidus n'a pas encore été testée. Le but est de faire une analyse comparative entre les agrégats légers (LWA) élaborés et ceux disponibles dans le marché et d'évaluer les effets de la température de frittage et des matières premières sur les propriétés des agrégats légers (LWA) durables. Les matières premières utilisées dans le cadre de cette étude sont : [74]

- Deux types d'argile : l'argile blanche et argilerouge.
- Boues d'épuration.
- Cendres de riz.

Tableau III.9 Composition chimique des matières premières [74].

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Autres	Loi(%)
Boues d'épuration.	17.36	6.84	48.51	13.24	1.82	0.00	2.61	9.62	56.3
Cendre de balle de riz.	92.11	2.43	0.71	0.72	0.05	0.52	3.46	0.00	5.1
Argile blanche	47.68	44.09	4.01	0.00	0.00	0.00	2.45	1.79	12.9
Argile rouge.	41.45	21.02	27.99	1.17	2.09	0.00	2.96	3.33	8.6

Conception et fabrication agrégats légers

Après caractérisation des matières premières, des mélanges binaires et ternaires ont été préparés parmi les matières premières. Le processus de formulation proposé visait à développer des mélanges avec une grande quantité de déchets et la composition chimique la plus proche possible de la gamme d'argile expansible proposée par Riley.

La figure III.1 représente les compositions chimiques des mélanges développés tracées sur le diagramme ternaire proposé par Riley. On peut observer que la plupart des mélanges formulés ont une composition chimique située à l'intérieur ou très près de la région expansible.

Ainsi, on s'attend à ce que la plupart des formulations présentent une viscosité capable de capter les gaz libérés à des températures élevées, modifiant la microstructure des pores de l'agrégat.

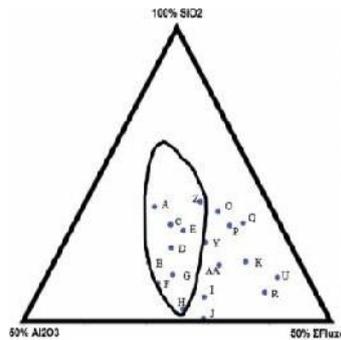


Figure III.32. Composition chimique des mélanges dans le diagramme de Riley

Dans un premier temps, les matières premières définies pour chaque formulation ont été homogénéisées manuellement. De l'eau a ensuite été ajoutée au mélange en quantités prédéfinies pour chaque formulation, obtenant ainsi un matériau avec une plasticité appropriée pour former les granulés sphériques manuellement. Les granulés bruts ont été séchés à température ambiante pendant 24 h et dans un four à une température de 110 ° C pendant encore 24 h. Cette méthode a permis d'obtenir des granulés de diamètres compris entre 8,4 et 14,3 mm. Ensuite, les granulés séchés sont passés par un processus de frittage. A ce stade, les granulés ont été soumis à des températures de 1100, 1150, 1200 et 1250 C pendant 15 min à une vitesse de chauffage de 8°C/min dans un four de frittage. Il est à noter que le choix d'une telle plage de température vise à inhiber la lixiviation des métaux lourds et se produit en raison des limitations techniques du four utilisé dans la recherche[74].

Caractérisation des agrégats légers

Après refroidissement, les agrégats frittés ont été caractérisés en déterminant l'indice de ballonnement, la LOI, la densité des particules sèches, l'absorption d'eau sur 24 h, la résistance à l'écrasement et la microstructure.

L'indice de ballonnement (BI) représente le changement de volume démontré par le culot lors du frittage, il est déterminé par l'équation $BI = 100 (V2 - V1) / V1$, dans laquelle le volume initial du culot brut et V2 est le volume final de ce culot La LOI a été définie par la variation de masse (en pourcentage) des granulés avant et après la combustion.

La détermination de la densité des particules sèches (ρ_d) et de l'absorption d'eau (WA24H) est strictement suivie les méthodes décrites dans NBR NM 53.

La résistance à l'écrasement du LWA a été déterminée à partir du chargement des granulés individuels jusqu'au point de rupture. Le test a été réalisé à l'aide d'une presse avec une capacité d'application de charge allant jusqu'à 5000 Kgf.

L'équation $S = 2,8 P_c / \pi x^2$ [36] a été appliquée pour déterminer la résistance à l'écrasement, où x est le diamètre du LWA analysé et P_c est la charge sous laquelle la fracture du granulés

produit. Le résultat est défini par la moyenne trouvée en trois répétitions du test. En raison du grand nombre d'échantillons développés dans cette étude, les tests de caractérisation microstructurale des LWA ont été effectués uniquement dans les agrégats avec les résultats les plus significatifs, et trois des LWA choisis sont présentés ici. La morphologie des LWA sélectionnés a été déterminée par microscopie électronique à balayage à l'aide d'un microscope.

Résultats et discussion

Indice de ballonnement

La méthodologie de frittage appliquée aux granulés bruts nous a permis d'évaluer l'effet des matières premières et de la température sur la variation volumétrique des agrégats légers fabriqués. Le **tableau III.2** présente les résultats de l'indice de ballonnement (BI) trouvé pour les échantillons brûlés pendant 15 min. à des températures de 1100, 1150, 1200 et 1250 C. Dans la plupart des cas, les agrégats frittés ont rétréci (BI <0), mais certains échantillons ont montré des valeurs de ballonnement significatives. L'indice de ballonnement avait une valeur minimale de 71,65% et un maximum de 40,83%, identifiés dans les échantillons W à 1150 C et Y à 1250 C, respectivement. Pour les échantillons contenant des SS, l'expansion la plus élevée était de 22,51%, détectée dans l'échantillon AA à 1250 C. Le comportement de ballonnement des échantillons mentionnés peut être compris à partir de l'évaluation conjointe du **tableau III.2** et de la **figure III.2**. Le phénomène de ballonnement dans les agrégats légers dépend de deux conditions de base : (a) la formation d'une phase liquide avec une viscosité suffisante pour piéger les gaz et (b) le dégagement de gaz provenant de la décomposition de matières organiques ou minérales pendant la phase formation. Ainsi, il existe une forte influence de la composition chimique et minéralogique sur la quantité et la viscosité de la phase liquide et sur la formation des gaz, respectivement dans ce contexte, considérant que la plupart des LWA fabriqués présentaient une contraction, il apparaît que la plupart des mélanges développés dans cette étude ne remplissent pas totalement les conditions nécessaires au ballonnement, même en se situant dans la région extensible proposée par Riley. Compte tenu de ce qui précède, il est également possible de comprendre l'effet de l'élévation de température sur la contraction représentée par la plupart des échantillons. Comme mentionné précédemment, l'ajout de SS a favorisé la réduction de la température de fusion des LWA manufacturés. Ainsi, l'élévation de température a conduit à la formation d'une plus grande quantité de phase liquide, favorisant la densification, et par conséquent le retrait de l'échantillon. Par conséquent, il est clair que l'élévation de la température tend à potentialiser la contraction des LWA.

Tableau III.10 Indice de ballonnement des échantillons [74].

Echantillons	Index de ballonnement			
	(BI) %			
	1100C°	1150C°	1200C°	1250C°
A	-5.05	-7.99	-20.54	-27.29
B	-6.68	-3.89	-2.18	-19.04
C	-2.29	-6.27	-17.93	-30.88
D	4.94	-1.99	-16.67	-22.73
E	-1.57	-6.09	-12.79	-33.40
F	3.03	5.29	-8.09	-14.53
G	-0.90	-0.37	-14.11	-33.40
H	1.56	-9.95	-14.74	-30.47
I	-6.84	-7.58	-16.59	-26.56
J	-7.07	-7.66	-7.66	-39.89
K	2.90	-10.76	-24.29	-25.86
L	0.82	-16.63	-31.64	-46.86
M	-3.02	-26.12	-38.79	-37.77
N	-25.86	-40.47	-59.42	-63.26
O	-8.05	-21.43	-21.03	-25.46
P	-15.10	-18.66	-30.23	-26.89
Q	-8.45	-17.85	-13.54	-4.95
R	-12.14	-16.42	-30.95	-38.48
S	-21.26	-38.17	-49.01	-45.82
T	-14.38	-24.41	-38.73	-38.38
U	*	*	*	*
V	-28.34	-26.45	-41.32	-51.34
X	-31.07	-52.89	-49.75	*
W	-50.16	-71.65	-60.70	*
Y	-19.37	-22.77	5.63	40.83
Z	-5.29	-31.24	-6.44	11.90
AA	-21.42	-26.78	11.74	22.51

(*) Fondu pendant le frittage

Tableau III.11. Densité, absorption, résistance mécanique des agrégats légers.

Echantillons	Densité de particules(ρ_d) (g/cm ³)				Absorption de l'eau (w_{24h}) (%)				Résistance à l'écrasement (s) (MPa)			
	1100 C°	1150 C°	1200 C°	1250 C°	1100 C°	1150 C°	1200 C°	1250 C°	1100C°	1150C°	1200C°	1250C°
A	1.05	1.16	1.32	1.56	42.9	35.0	23.7	12.5	0.32±0.02	0.96±0.09	4.33±0.34	8.57±0.24
B	1.04	1.12	1.25	1.48	50.3	40.7	29.9	16.8	0.24±0.09	0.47±0.001	2.02±0.43	5.35±1.26
C	1.05	1.08	1.27	1.46	45.2	41.4	27.4	16.0	0.29±0.08	0.64±0.18	3.72±0.69	7.82±0.57
D	1.03	1.06	1.23	1.43	49.3	43.9	29.1	17.7	0.27±0.06	0.45±0.03	2.44±0.35	6.89±0.18
E	0.99	1.09	1.17	1.43	54.0	39.3	36.5	15.7	0.32±0.11	0.48±0.06	1.30±0.22	6.61±0.45
F	1.06	1.10	1.15	1.41	48.9	41.5	37.2	20.6	0.17±0.04	0.26±0.05	1.49±0.15	5.28±0.51
G	0.96	1.14	1.14	1.37	55.0	32.9	35.6	20.1	0.16±0.01	0.28±0.02	1.32±0.23	4.62±0.4
H	0.93	1.01	1.13	1.32	57.4	49.3	37.1	24.7	0.07±0.00	0.17±0.02	1.01±0.14	3.76±0.78
I	0.88	0.96	1.11	1.31	60.9	50.9	38.2	24.7	0.08±0.01	0.31±0.03	1.59±0.26	4.67±0.03
J	0.87	0.93	1.07	1.31	63.6	56.0	41.8	25.0	0.07±0.00	0.17±0.01	0.83±0.07	4.05±0.64
K	0.74	0.85	0.98	1.10	79.5	62.2	46.5	37.2	0.06±0.01	0.17±0.03	1.30±0.21	3.26±0.42
L	0.72	0.84	1.14	1.43	85.7	66.2	36.3	15.8	0.06±0.01	0.09±0.02	1.15±0.14	4.20±0.81
M	0.63	0.78	1.05	1.15	100.8	75.2	45.5	37.5	0.03±0.01	0.05±0.00	1.00±1.10	1.89±0.10
N	0.63	0.91	1.44	1.58	105.9	60.2	17.0	3.1	0.03±0.00	0.04±0.01	2.33±0.16	4.30±0.26
O	1.17	1.39	1.60	1.49	33.7	19.1	6.4	4.4	3.14±0.43	5.76±0.90	10.36±0.49	9.72±0.59
P	1.09	1.25	1.48	1.49	39.7	25.9	11.9	9.9	1.84±0.09	4.82±0.29	6.92±0.69	7.43±1.58
Q	0.90	0.98	1.10	1.14	56.0	48.2	36.0	31.4	0.40±0.08	1.50±0.08	2.63±0.26	2.71±0.53
R	0.82	1.01	1.23	1.32	67.8	45.8	29.7	20.7	0.27±0.05	1.16±0.37	2.85±0.28	3.11±0.89
S	0.81	1.10	1.54	1.38	71.3	42.8	5.7	2.9	0.16±0.01	1.43±0.50	5.74±0.36	5.17±0.76
T	0.67	0.82	1.00	1.31	92.2	70.4	50.4	39.9	0.03±0.00	0.12±0.05	1.10±0.23	1.81±0.35
U	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
V	0.64	0.71	0.93	1.09	92.9	88.4	57.5	44.0	0.02±0.00	0.02±0.00	0.4±0.08	1.21±0.46
W	1.10	2.01	1.69	*	47.9	8.7	1.0	*	0.56±0.07	6.33±0.61	5.02±0.16	*
X	1.27	1.85	1.84	*	35.6	9.2	0.7	*	2.44±0.65	6.34±0.75	6.80±2.56	*
Y	1.80	1.87	1.39	1.06	9.6	2.9	2.8	2.1	13.59±2.21	17.28±2.11	9.33±0.18	5.17±0.36
Z	1.53	1.80	1.49	1.33	18.4	6.1	5.0	3.6	7.52±1.62	15.46±0.77	10.3±0.70	7.56±0.96
AA	1.47	1.72	1.35	1.08	18.2	6.8	4.3	2.3	6.37±0.42	9.83±2.01	8.36±0.21	4.60±0.43

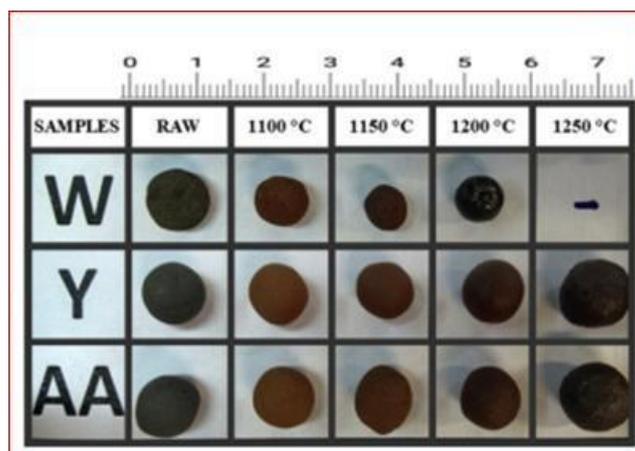


Figure III.33. Photographies de LWA fabriquées, avec des échantillons W, Y et AA [74].

Perte de masse

Les résultats variaient de 5,2% à 43,6%, qui ont été trouvés dans les échantillons Y à 1 100 C et W à 1 150 C, respectivement. En général, la majeure partie de la perte de masse du granulat léger (LWA) était concentrée à des températures inférieures à celles adoptées dans la méthodologie de frittage, révélant que la plage de température utilisée n'exerce pas une forte influence sur un tel comportement. Apparemment, les principales causes de perte de masse de LWA sont l'oxydation de la matière organique et les dés hydroxylation des minéraux argileux. Selon **la figure III.3**, il existe une forte corrélation entre la perte de masse de LWA et la teneur en SS ajoutée au mélange. Dans tous les échantillons fabriqués, l'augmentation de SS dans le mélange a entraîné une augmentation de la perte de masse après le processus de frittage, révélant que le contrôle de la LOI dans les agrégats en question est fortement régi par la teneur en SS utilisée. Dans ce contexte, l'effet du SS sur la LOI peut être attribué à la grande quantité de matière organique trouvée dans le résidu.

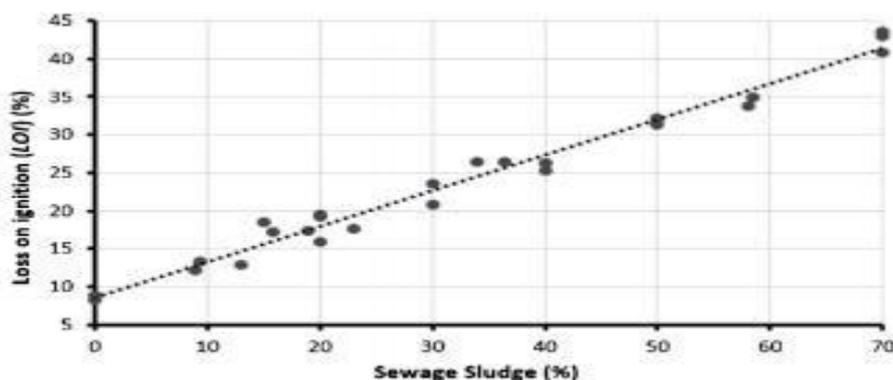


Figure III.34. Relation entre la quantité de SS et la perte de masse des agrégats légers fabriqués [74].

Densité, absorption d'eau et résistance mécanique

La densité, l'absorption d'eau et la résistance mécanique sont des paramètres couramment utilisés pour la classification et l'utilisation des agrégats légers appliquée aux travaux d'ingénierie. Ainsi, ces propriétés sont présentées (**tableau III.3**) et discutées ensemble dans cette section. De tous les agrégats légers fabriqués, seul l'échantillon W brûlé à 1150° C avait une densité de particules supérieure à 2,00 g/cm³. La plus faible densité de particules enregistrée dans cette étude était 0,63 g/cm³ et a été trouvée dans les agrégats M et N, tous deux frittés à 1100° C. Les résultats d'absorption d'eau variaient entre 0,7% et 105,9%, que l'on trouve respectivement dans les échantillons X à 1200°C et N à 1100°C. Les agrégats légers appliqués au béton structural ont généralement un WA24H maximum de 20%, mais lors de l'application des agrégats légers dans d'autres services tels que les applications géotechniques, des taux d'absorption d'eau plus élevés deviennent attractifs. Les valeurs de résistance à l'écrasement obtenues par divers LWA manufacturés sont encourageantes, d'autant plus que les LWA avec une résistance mécanique supérieure à 2,3 MPa sont souvent appliqués dans la production de bétons de structure légers. D'autre part, de nombreux échantillons présentaient une résistance mécanique inférieure à 1,0 MPa, rendant leur application irréalisable dans tout type de travaux ou de services d'ingénierie. Dans l'ensemble, l'augmentation de la température de frittage a eu pour résultat une densité de particules et une résistance mécanique accrues et une absorption d'eau réduite. Un tel comportement est étroitement lié à la formation d'une plus grande quantité de phase liquide lors de la montée en température. On suppose que la structure interne des pores a été altérée par la fusion des particules, favorisant le remplissage des vides par la phase liquide, la réduction de la taille des pores et de la porosité ouverte, et la formation d'une matrice vitrifiée.

Microstructure

Les échantillons Z, AA et S, frittés à 1150, 1200 et 1250° C, ont été sélectionnés pour une évaluation de la morphologie interne par balayage à la microscopie électronique comme le montre la figure III.4. Le choix de ces échantillons d'agrégats légers est dû à l'intérêt d'appliquer ces agrégats dans les travaux futurs. L'analyse conjointe des images permet d'établir une relation entre l'influence de la température et des matières premières sur le comportement des agrégats légers fabriqués. **Les figures III.4a et d** montrent que l'ajout de SS au mélange a favorisé l'apparition de pores plus nombreux et plus grands sur la surface de fracture agrégats légers (LWA). Comme indiqué précédemment, la décomposition de la matière organique trouvée dans les solides solubles a tendance à être caractérisée comme le principal agent de cet événement. Le fait en question a favorisé la réduction de la densité des

particules, mais il a également entraîné une perte de résistance mécanique et une augmentation de l'absorption d'eau. On remarque également la forte influence du SS sur le point de fusion des LWA (**Figures III.4b, c et h**). Pour la même température de frittage, la vitrification devient plus significative à partir de l'élévation de la teneur en boues dans les mélanges, contribuant au retrait et à l'augmentation de la densité de l'échantillon S à 1200° C. La teneur élevée en oxydes (Fe_2O_3 , CaO , MgO , K_2O) trouvée dans les SS est la principale cause de cet effet. L'effet de la RHA sur la performance des LWA peut être évalué à partir des changements identifiés dans deux groupes d'images (**Figures III.4a, d et g**) et (**Figures III.4a et c**). Dans le premier cas, la grande quantité de RHA dans l'échantillon Z contribue à un plus grand raffinement des pores, conduisant à des gains de résistance et à une réduction de l'absorption. Le fait en question est principalement contrôlé par la finesse et la faible teneur en matière organique que l'on trouve dans la RHA. Dans le second cas, la forte concentration de SiO_2 dans la RHA a augmenté le point de fusion du mélange Z, tout en contribuant à la formation d'une phase liquide, avec une viscosité idéale pour piéger les gaz générés dans les échantillons, ce qui se traduit par un indice de ballonnement plus élevé d'environ 11,9% à 1250°C.

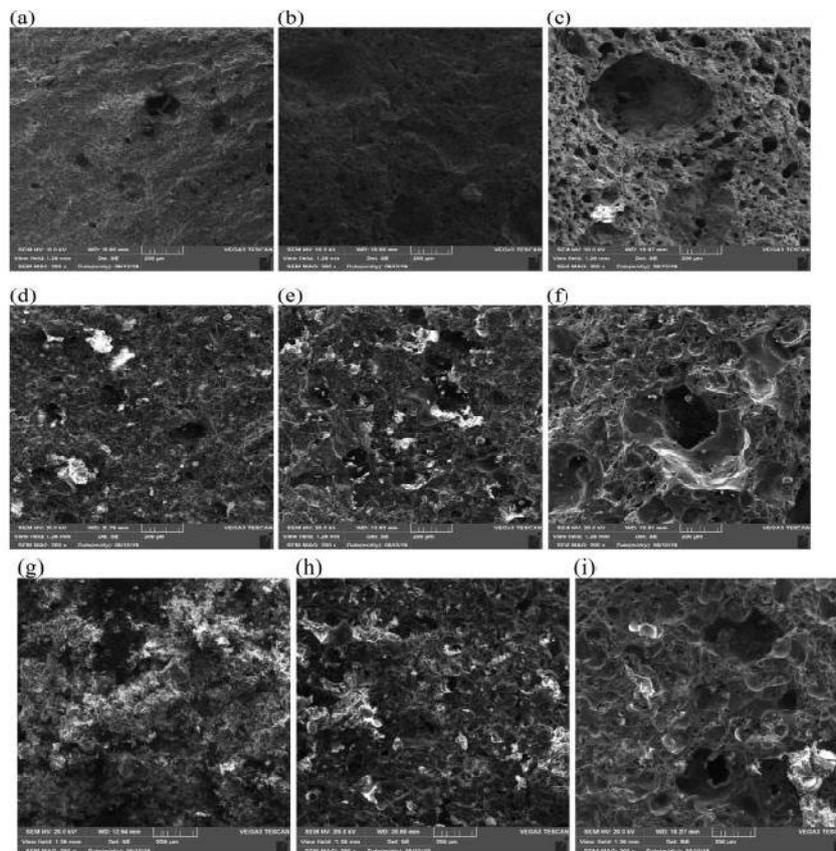


Figure III.35. Images de microscopie électronique à balayage [74].

Classification des agrégats légers fabriqués

Le tableau III.4 présente la classification obtenue pour chaque MRV fabriqué selon les critères préétablis dans **Tableau III.3**. En général, des agrégats légers appropriés pourraient être produits pour toutes les applications énumérées dans le ce dernier à partir de l'addition contrôlée de 0 à 70% de SS et de 0 à 57% de cendre de balle de riz, en particulier lorsqu'ils sont frittés à 1200 et 1250° C. Cependant, peu d'échantillons ont montré la possibilité d'application lorsqu'ils sont frittés à 1100 et 1150 C, dont il convient de mentionner qu'aucun d'entre eux ne contenait du WC dans leur composition. Selon le tableau suivant, parmi tous les agrégats léger (LWA) fabriqués, 26 spécimens avaient des propriétés adaptées à une utilisation dans des bétons structurels. Dans la plupart des cas, les agrégats de ce groupe avaient un rd et un S plus élevés et un WA24H plus faible, avec les valeurs moyennes suivantes : 1,53 g/cm³, 8,28 MPa et 8,8%, respectivement. Parmi les LWA de cet ensemble, il est intéressant de mettre en évidence deux échantillons: (a) d'un point de vue durable, on met en évidence l'échantillon S brûlé à 1250° C, car même avec une forte teneur en résidus dans son mélange (50% SS et 30% RHA) le matériau présentait des propriétés appropriées pour une application dans du béton à haute résistance, (b) du point de vue commercial, le LWA produit avec le mélange Y fritté à 1150° C se démarque car cet échantillon présentait des valeurs de S et WA24H bien mieux que certains LWA commerciaux. Enfin, le groupe d'application des LWA dans les services de jardinage, d'aménagement paysager, d'isolation thermique et acoustique a obtenu un total de 34 spécimens, dont 29 font également partie du groupe précédent. Il est à noter que le nombre d'échantillons adaptés à de telles utilisations pourrait être encore plus élevé si les critères délimités pour l'absorption d'eau étaient plus complets, ce qui est souhaitable pour certains services appartenant à ce groupe. Dans l'ensemble, ces LWA présentaient un rd faible (1,31 g/cm³), un S modéré (4,01 MPa) et un WA24H élevé (25,7%), et comme dans le groupe précédent, le résultat le plus significatif était l'échantillon K fritté à 1250°C.

Tableau III.12. Classification des agrégats légers selon le type d’application

Mélanges	Applications																		
	1100 °C				1150 °C				1200 °C				1250 °C						
A	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	◇	◊	●	△	□	◇	◊	●
B	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	◇	◊	●	△	□	◇	◊	●
C	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	◇	◊	●	△	□	◇	◊	●
D	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	◇	◊	●	△	□	◇	◊	●
E	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	●	△	□	◇	◊	●
F	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	●	-	-	◇	◊	●
G	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	●	-	-	◇	◊	●
H	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	●	-	-	◇	◊	●
I	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	◇	◊	●
J	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	◇	◊	●
K	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	◇	◊	●
L	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	●	-	□	◇	◊	●
M	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	◇	◊	●
N	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	●
O	-	-	◇	◊	●	△	□	◇	◊	●	△	□	◇	◊	-	△	□	◇	◊
P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	●	△	□	◇	◊
Q	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	●
R	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	◇	◊	●	-	-	◇	◊	●
S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	△	□	◇	-	-	△	□	◇	-
T	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
U	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
W	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	△	□	◇	-	-	-	-	-	-
X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	△	□	◇	-	-	-	-	-	-
Y	△	□	◇	◊	●	△	□	◇	◊	-	-	△	□	◇	-	-	△	□	◇
Z	△	□	◇	◊	●	△	□	◇	◊	-	-	△	□	◇	-	-	△	□	◇
AA	△	□	◇	◊	●	△	□	◇	◊	-	-	△	□	◇	-	-	△	□	◇

(-) Ne répond pas aux critères préétablis, (△) Béton à haute résistance, (□) Béton léger structurel, (◇) Béton léger non structurel et mortiers légers, (◊) Applications géotechniques, (●) Jardinage et aménagement paysager, Isolation thermique et acoustique.

Conclusion

Dans l’ensemble, cette recherche a révélé que les SS et les RHA ont un potentiel important pour fabriquer des LWA selon la norme européenne EN-13055-1. Des LWA avec des propriétés adéquates pour les principales applications de LWA dans les travaux et services d’ingénierie ont été obtenus à partir de l’ajout contrôlé jusqu’à 70% de SS et 57% de RHA, donnant dans certains cas de meilleurs résultats que les LWA commerciaux. Plus précisément, on peut conclure que: [74]

- Les résultats rd, WA24H et S, obtenus par les LWA fabriqués, ont démontré qu’il était possible de produire des LWA adaptés pour une application dans : (a) du béton à haute résistance, avec jusqu’à 80% de résidus, (50% SS et 30% RHA), (b) structure légère, mortiers légers non structurels, même avec 95% de résidus (70% SS et 25% RHA) et (c) géotechnique, jardinage, aménagement paysager, isolation thermique et 90% de résidus (40% SS et 50% RHA).
- Il a été démontré que l’application de solides solubles dans la production de LWA extensibles est assez restreinte, limitée à l’utilisation de niveaux inférieurs à 20% du résidu dans des mélanges potentiellement extensibles. Dans de nombreux cas, l’augmentation de la teneur en MES a provoqué une contraction, une résistance mécanique réduite et une absorption d’eau accrue en raison de la grande quantité de matière organique présente dans les SS.

- L'utilisation de RHA s'avère bénéfique pour la fabrication de LWA. La surface spécifique élevée et la faible quantité de matière organique dans les RHA soutiennent les gains de résistance et l'absorption d'eau réduite. La teneur élevée en SiO₂ présente dans la RHA a facilité l'obtention de mélanges à composition chimique extensible.
- L'augmentation du rapport de RC dans les mélanges améliore les propriétés principales des LWA frittés. Le matériau montre une forte influence sur le phénomène de ballonnement.
- Les LWA peuvent être fabriqués à partir d'un frittage à 1100° C. Cependant, il est recommandé de brûler les LWA à des températures plus élevées. La formation de gaz dans la structure interne des LWA est fortement influencée par l'augmentation de la température, en particulier dans la plage de 1200 à 1250°C.

Avec :

SS : Boues d'épuration.

LWA : Agrégats légers.

CR : Argile rouge.

RHA : Cendres de cosse de riz.

Cette recherche faite le 9 novembre 2019 par M. Kalpana, AhohTayu sur le thème : Recherche expérimentale sur béton léger additionné de déchets industriels (déchets d'acier), Dans cette recherche, en utilisant des déchets d'acier dans du béton de perlite léger structurel, un certain nombre d'échantillons ont été préparés et la compatibilité de ce type de déchets d'acier comme armature dans du béton léger a également été étudiée. Des essais de compression, de traction et de flexion à 28 jours d'âge ont été réalisés sur le béton armé avec des déchets d'acier. Ces déchets sont utilisés dans le béton de perlite léger. 0,5% et 1% du volume ont été ajoutés au mélange. Les résultats montrent qu'il y a eu une amélioration significative des caractéristiques de traction et de flexion du béton de perlite léger [75].

Matériaux et méthodes

Le ciment est utilisé avec une masse volumique apparente de 1260 kg/m³ et une densité de 3,12 pour le mélange de béton, la perlite est utilisée dans cette étude avec une taille maximale de 5 mm et une masse volumique apparente entre 30 et 150 kg/m³. Grâce à l'isolation thermique, la perlite améliore également la résistance au feu, réduit la transmission du bruit à travers le béton. La perlite a une teneur en eau relativement très élevée. Un sable industriel a été utilisé avec une taille maximale de 5 mm. Un super plastifiant constitué de naphthalène formaldéhyde sulfoné a été utilisé comme adjuvant tout en mélangeant le béton frais avec une alimentation constante de 8% en poids de ciment. Il est d'apparence brune avec une densité de

1,2. Il est utilisé pour diminuer le rapport eau/ciment sans perturber l'ouvrabilité. Les déchets d'acier dans le béton léger sont de très petite taille et de formes différentes. L'acier est très bon avec la résistivité à la corrosion et la conductivité thermique. Trois parties avec une fraction volumique de 0%, 0,5% et 1% de béton armé de déchets d'acier sont fabriquées.

Le **tableau III.5** montre les trois mélanges réalisés. Pour fabriquer le béton de perlites légères renforcées de déchets d'acier, le sable et la perlite ont été soigneusement mélangés pendant une minute. Puis du ciment a été ajouté à ce mélange qui est à nouveau bien mélangé, en dernier lieu les déchets d'acier sont ajoutés et mélangés pendant 1 à 2 min. Un total de 9 cubes, 9 cylindres et 9 éprouvettes prismatiques ont été préparés pour les essais de compression, de traction et de flexion. Ce spécimen est conservé dans l'eau pendant 28 jours pour le durcissement. Un total de 9 cubes est préparé avec des dimensions de 150 à 150 mm. Sur ces 9 cubes, 3 cubes sont normaux et 6 autres cubes sont mélangés avec 0,5% et 1% de déchets d'acier par fraction volumique. Les tests ont été effectués en utilisant une machine de test universelle.

Tableau III.13. Les proportions des trois types de mélanges réalisés [75].

Mélange	Ciment	Sable	Perlite	Déchets d'acier (%)	w/c	super plastifiant(%)
NORMAL	1	0,5	1	0	0,4	8
SWRC(0,5%)	1	0,5	1	0,5	0,4	8
SWRC(1%)	1	0,5	1	1	0,4	8

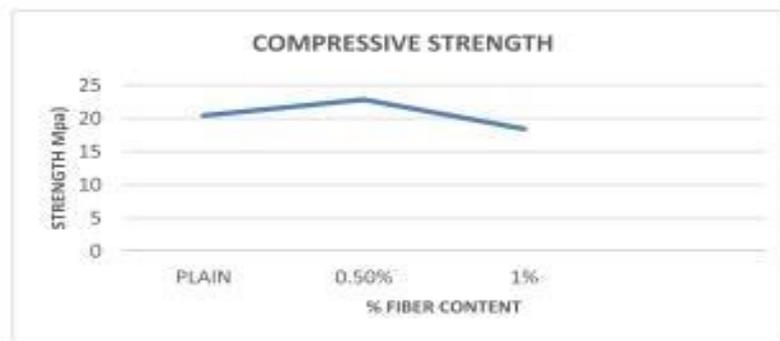
Résultats et discussion

Résistance à la compression

Le **tableau III.6** et la **figure III.5** représentent les valeurs de résultat du l'essai de la résistance mécanique à la compression du béton léger renforcé de déchets d'acier par rapport au béton ordinaire. La résistance mécanique à la compression moyenne et la masse volumique des spécimens se situaient entre 18 à 23 MPa et 1708,5 à 1800 kg/m³, respectivement comme on peut le voir sur la **figure III.2**, l'augmentation de la teneur en déchets d'acier de 0% à 0,5% augmente la résistance à la compression de 13% par rapport au béton ordinaire. En ajoutant plus de déchets d'acier jusqu'à 1%, la résistance à la compression diminue de 7% par rapport au béton ordinaire. Cette diminution de la résistance à la compression pourrait être due au problème de dispersion des déchets d'acier dans un mélange léger car leur forme et leur taille sont irrégulières.

Tableau III.14. Résultats des essais de la résistance mécanique à la compression [75].

Spécimen	Béton brut	SWRC (0,5%)	SWRC (1%)
A	21,1	23,64	19,4
B	19,3	22,7	18,1
C	20,4	22,2	18,8
Moyenne	20,26	22,84	18,76

**Figure III.36.** La résistance moyenne à la compression [75].

Résistance à la traction

Le **tableau III.7** et la **figure III.6** montrent les résultats de la résistance à la traction des éprouvettes en béton ordinaire est comparé au béton renforcé par des fibres d'acier, les résultats des tests montrent que contrairement à la résistance à la compression, la résistance à la traction augmente avec l'augmentation de la teneur en déchets d'acier à 0,5%, elle est augmentée de 18% et à 1%, elle est de 45% par rapport au béton ordinaire, cela montre que les déchets d'acier ont un très bon effet sur la résistance à la traction du béton. Toujours sur le béton brut après essai, la fissure est facilement visible par contre le béton renforcé par des fibres d'acier (SWRC) qui montre que les déchets d'acier réduisent la fragilité du béton.

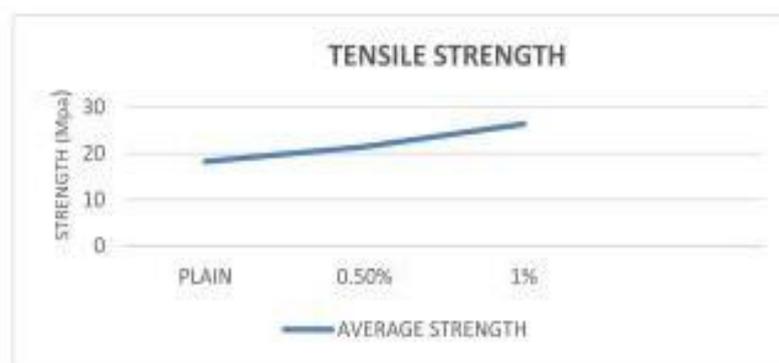
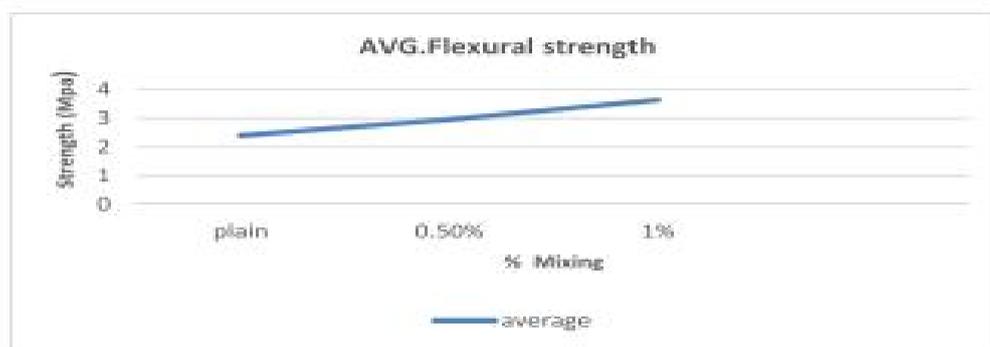
**Figure III.37.** La résistance moyenne à la traction [75].

Tableau III.15. Résultats des essais de résistance mécanique à la traction [75].

Spécimen	Béton brut	SWRC (0,5%)	SWRC (1%)
A	19,3	21,6	26,32
B	17,8	21,9	25,9
C	17,6	20,8	26,8
Moyenne	18,23	21,43	26,34

Résistance à la flexion

Les résultats des essais de résistance mécanique à la flexion de différents mélanges est présenté dans le **tableau III.8** et la valeur moyenne et la **figure III.7**. Les résultats montrent que toutes les valeurs de résistance à la première fissure de béton renforcé par des fibres d'acier (SWRC) sont supérieures à celles du béton ordinaire. L'incorporation de déchets d'acier dans le béton augmente la résistance à la flexion donc à 0,5% et à 1% de déchets d'acier, la résistance est augmentée avec une moyenne de 23% et 52% respectivement de plus que le béton léger normal [75].

**Figure III.38.** La résistance moyenne à la flexion**Tableau III.16.** Résultat des essais de flexion

Spécimen	béton brut	SWRC (0,5%)	SWRC (1%)
A	2,68	2,9	3,50
B	2,011	2,85	3,80
C	2,50	3,1	3,60
Moyen	2.397	2.95	3.63

Conclusion

Dans ce travail de recherche, le comportement mécanique des bétons légers renforcé par les fibres de déchets d'acier a été étudié. On remarque que l'ajout de déchets d'acier jusqu'à 0,5% augmente la résistance à la compression de 13% par rapport au béton léger normal, mais diminue lorsque les déchets d'acier sont ajoutés jusqu'à 1% de 7% par rapport au béton léger

normal. Le béton renforcé par des fibres d'acier (SFRC) a une résistance à la traction à la rupture très élevée par rapport au béton ordinaire, même à faible volume de déchets d'acier, on peut voir que la résistance à la traction à la rupture augmente de 18% (à 0,5% de déchets d'acier) et de 45% (à 1% de déchets d'acier) cela montre que même une très faible quantité de déchets d'acier améliore le comportement mécanique à la rupture de béton renforcé par des fibres d'acier (SWRC). En ajoutant des déchets d'acier, la résistance à la flexion est augmentée de 23% (à 0,5% de déchets d'acier) et de 52% (à 1% de déchets d'acier) par rapport au béton léger normal. On peut en conclure que les déchets d'acier augmentent considérablement les propriétés mécaniques du béton léger. Il a un effet très significatif sur les propriétés de traction et de flexion par rapport à la propriété de compression. Ainsi, en considérant qu'il est économique, cela aide à augmenter les propriétés mécaniques et à réduire la pollution, il peut être un choix raisonnable pour le renforcement du béton léger [75].

En août 2019 une recherche faite par Nahla Naji Hilalet al sur le béton léger auto plaçant contenant des coquilles de noix comme agrégats grossiers, coquille de noix est l'un des déchets agricoles qui peuvent être utilisés comme substitut d'agrégat dans le béton auto plaçant. Sur le thème : Propriétés frais et durcies du béton léger auto plaçant contenant des coques de noix usagées comme agrégats grossiers.

Matériaux utilisés [76].

- Ciment Portland ordinaire de type I ayant une densité de 3,15 et une finesse de Blaine de 2500 cm²/g a été utilisé et il satisfait à la norme irakienne IQS n ° 51984.
- La fumée de silice (SF) avec une densité de 2,2 et 93,4% de SiO₂ à un dosage de 12% de poids de ciment a été utilisée comme ajout minéral.
- Un granulats naturel grossier ayant une densité spécifique de 2,71 et une taille maximale de 12,5 mm a été utilisé et il satisfait à la norme ASTM C136 / C136M-14 (2009) ainsi qu'à l'IQS n ° 451984.
- Un sable naturel de rivière avec une densité spécifique de 2,67, un module de finesse de 2,8 et une taille maximale de 4,75 mm a été utilisé pour la préparation des spécimens.
- les coques de noix usagées (WS) ayant une densité de 0,96 et une absorption d'eau de 10% ont été lavées avec de l'eau claire pour éliminer toute saleté, puis ont été séchées à l'air libre. Les WS nettoyés ont été broyés jusqu'à une épaisseur de 0,86 à 1,35 mm et une taille maximale de 12,5 mm (**Figure III.8**).



Figure III.39. Les matériaux utilisés dans le mélange[76].

Avec :

- CA (granulats grossiers).
- WS (Coques de noix usagées).
- LS (Calcaire).
- NS (Sable naturel).
- OPC (Ciment Portland ordinaire).
- SF (Fumée de silice).
- Sp (Superplastifiant).

Préparation des mélanges

La teneur en ciment est de 450 kg/m^3 , le rapport E/C est de 0,36 pour tous les mélanges de béton auto plaçant et le dosage du super plastifiant a été maintenu constant à 2% dans tous les mélanges pour obtenir l'ouvrabilité requise, les coquilles de noix usagées ont été remplacées par un agrégat grossier à différents pourcentages (5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40%, 45% et 50%) par volume. La procédure de mélange proposée par Khayat et al. (2000), a été adoptée dans cette étude pour obtenir la même uniformité et homogénéité pour tous les mélanges de béton auto compactant. Au départ, les coquilles de noix broyées et les granulats grossiers ont été mélangés de manière homogène à l'état sec pendant trente secondes dans un mélangeur à entraînement électrique. La moitié de l'eau a été ajoutée au mélange et puis malaxée pendant une minute. Les agrégats fins et grossiers ont été mélangés et malaxés pendant une minute. Ensuite, le ciment et le SF ont été ajoutés et mélangés pendant une minute aussi. Ensuite, le super plastifiant et l'eau restante ont été versés dans le mélange et tous les matériaux ont été laissés pendant trois minutes pour un mélange correct et le malaxeur a été arrêté une fois que le mélange de béton auto plaçant était atteint. Enfin, le béton auto plaçant a été mélangé pendant 2 min supplémentaires. Après cela, le béton a été coulé dans des moules sans aucune vibration et couvert par feuille de plastique mince à 20 ± 4

C en laboratoire. Après 24 h, les spécimens ont été démoulés et placés dans un réservoir d'eau pour durcissement pendant 28 jours.

Procédure expérimentale

Ouvrabilité du béton

La capacité de remplissage du béton auto plaçant est évaluée en mesurant la moyenne des deux diamètres de la galette du béton après avoir soulevé le cône d'Abrams et que l'étalement du béton est total (**Figure III.9**).



Figure III.40. Mesure du diamètre d'écoulement à affaissement pour WS50 [76].

Résistance à la compression

La résistance à la compression a été réalisée à l'âge de 28 jours en utilisant une machine de compression ayant une charge maximale de capacité 2000 kN. Des cubes en béton auto plaçant de dimension $(100 \times 100 \times 100)$ mm³ ont été utilisés selon la norme BS 1881 : part 116 : 1983.

La force de liaison

La force de liaison du béton auto plaçant a été évaluée selon RILEM RC6 (1994); dans cette recherche, dans cette recherche, une barre de 10 millimètres de diamètre en acier et un spécimen de dimension $(100 \times 100 \times 100)$ mm³ ont été employés selon spécifications de RILEM RC6 (1994) (en utilisant une machine ayant la portance de 600 kN).

Vitesse d'impulsion ultrasonique (UPV)

L'essai de vitesse d'impulsion ultrasonique (UPV) a été effectué selon ASTM C597-09 à l'âge de 28 jours. Dans l'essai UPV, le temps requis pour que les vagues passent une distance prédéterminée a été enregistré.

Résultats et discussions

Propriétés à l'état frais

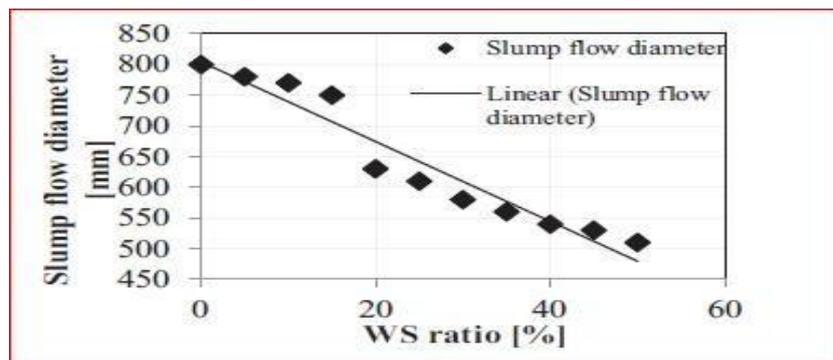
- **Essais d'écoulement et le T50**

Les résultats de mesure du diamètre d'écoulement sont représentés dans **Tableau III.9**

Tableau III.17. Résultats expérimentaux des différents mélanges réalisés [76].

Mélange ID	Mélange ID Densité fraîche [kg/m ³]	Entonnoir en V [sec]	L-box	T50 [sec]	SFD [mm]	Résistance à la compression [MPa]	Densité sèche (kg/m ³)	UPV (km/sec)	Tmax [MPa]
WS0	2323	7	0.95	2.0	800	57	2118	4.33	13.16
WS5	2253	9	0.92		780	49	1990	4.28	12.81
WS10	2208	11	0.89	3.5	770	47	1970	4.18	11.57
WS15	2162	13	0.86		750	45	1955	4.15	10.82
WS20	2210	15	0.83	4.5	630	43	1930	4.13	9.11
WS25	2062	17	0.80		610	41	1905	3.77	8.59
WS30	2015	19	0.77	5.5	580	38	1885	3.67	7.55
WS35	1967	21	0.74		560	35	1865	3.57	6.55
WS40	1918	23	0.71	5.5	540	32	1843	3.47	5.55
WS45	1868	25	0.68		530	29	1823	3.37	4.55
WS50	1817	27	0.65	7.5	510	26	1818	3.27	3.56

La figure III.10 représente le diamètre d'écoulement des différents mélanges réalisés.

**Figure III.41.** Diamètre d'écoulement des différents mélanges réalisés

On remarque que l'utilisation des coques de noix usagées provoque la réduction de diamètre d'écoulement de béton auto plaçant, la principale raison de cette réduction de diamètre d'écoulement peut être attribuée à la forme irrégulière et à la capacité d'absorption des coques de noix usagées par rapport à l'agrégat naturel grossier. Toutefois ; l'utilisation d'un volume des coques de noix usagées supérieur à 35% a conduit à des valeurs de diamètre d'écoulement inférieures aux limites minimales de l'EFNARC (2005).

- **Essai de temps d'écoulement à l'entonnoir en V**

D'après les résultats de l'essai de temps d'écoulement à l'entonnoir en V, ils ont clairement remarqué que l'augmentation de la fraction volumique des coques de noix usagées provoque une augmentation des valeurs du temps d'écoulement à l'entonnoir en V. Le temps passe de 7 s à 0% de coques de noix usagées à 27 s à 50% de coques de noix usagées.

- **Essai de L-box**

D'après les résultats du rapport H_2/H_1 pour l'essai L-box, l'utilisation de coques de noix usagées a provoqué une réduction du rapport H_2/H_1 . Les résultats des mélanges avec un dosage de coques de noix usagées supérieur à 25% ne sont pas conformes à l'EFNARC(2005). Une telle diminution des valeurs du rapport H_2/H_1 peut être attribuée à la nature de la surface des particules de coques de noix usagées (inégaie, convexe et concave) et l'absorption d'eau de celui-ci qui a conduit à plus de résistance à la friction à l'intérieur du mélange et ensuite réduit la capacité de passage.

Propriétés à l'état durcies

- **Résistance à la compression**

La résistance à la compression diminue en augmentant la fraction volumique de coques de noix usagées, les valeurs de la résistance à la compression diminuent de 57 MPa pour le mélange de référence à 0% pour atteindre 26 MPa pour le mélange à 50% de coques de noix usagées, la raison principale de cette réduction est due à une faible liaison entre les particules de coques de noix usagées et la pâte cimentaire, également à cause de la faible quantité de pâte cimentaire, qui ne permet pas de remplir les côtés concaves des particules de coques de noix usagées [76].

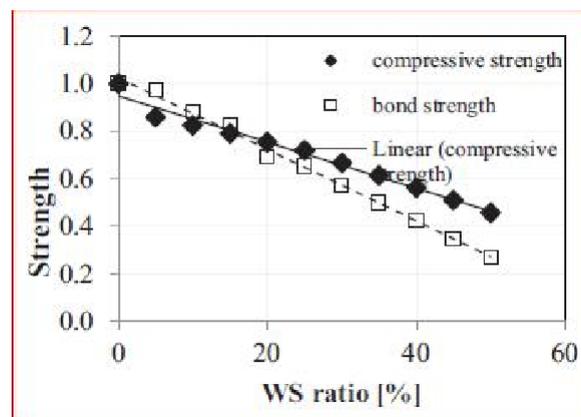


Figure III.42. Résistance à la compression et force de liaison en fonction de la teneur de coques de noix usagées

- **La force de liaison**

D'après les résultats de la force de liaison, on peut observer qu'il y avait une réduction de la force de liaison lors de l'augmentation de la quantité de coques de noix usagées utilisés dans le béton auto-plaçant. La réduction minimale et maximale de la force d'adhérence par rapport au mélange de référence était de 3% et 73% en fraction volumique à 5% et 50% de coques de noix usagées respectivement. La figure III.12 illustre la relation entre la force de liaison et les fractions volumiques de coques de noix usagées. La diminution de la force de liaison peut

être interrompue par la réduction de l'ouvrabilité du béton auto plaçant via l'utilisation de coques de noix usagées et la formation de vides. La formation de tels vides peut entraîner une faiblesse de la zone de transition inter faciale autour des particules de coques de noix usagées et un effet dans les formes des zones de transition inter faciales autour de la barre d'armature.

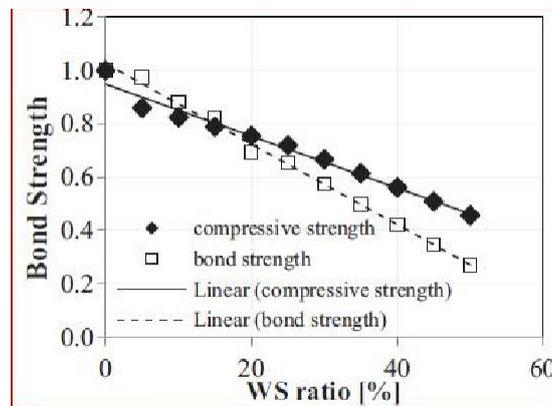


Figure III.43. Force de liaison en fonction de la teneur de coques de noix usagées

- **Densité**

Les densités à l'état frais et à l'état durci diminuent lorsque la fraction volumique de coques de noix usagées augmente. Le taux de cette diminution est identique pour les produits frais et densités sèches comme le montre la figure III.13. Cette réduction des densités peut être attribuée à la faible densité des particules de coques de noix usagées par rapport à l'agrégat grossier naturel et à la formation de vides qui sont également un résultat de la forme de coques de noix usagées (WS). Les valeurs de densité à l'état durci obtenues dans cette

recherche vont de 1813 à 1990 kg/m³. Ces valeurs sont presque proches de la limite supérieure pour les bétons à granulats légers composé de mélange d'agrégats légers et naturels ou complètement d'agrégats légers selon ASTM (2004), dont les valeurs de densité allant de 1120 à 1920 kg/m³.

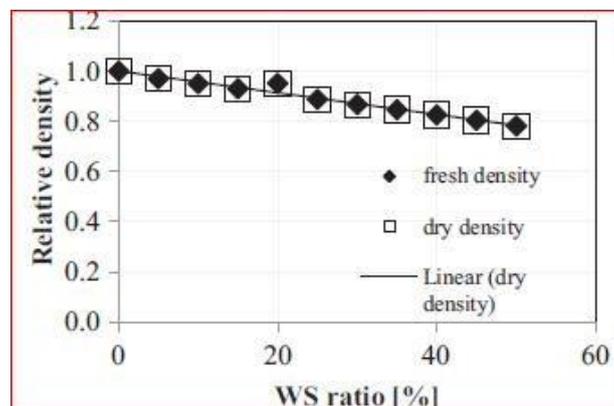


Figure III.44. Densité relative à l'état frais et durci en fonction de la teneur de coques de noix usagées.

- **UPV**

D'après les résultats de l'essai de vitesse d'impulsion ultrasonique (UPV), on remarque une diminution de UPV de 4,28 km/sec à 5% de coques de noix usagées (WS) à 3,27 km/sec à 50% de coques de noix usagées (WS), cette diminution peut être expliquée par le fait qu'une fois que l'onde ultrasonore traverse différents matériaux (ciment durci, granulats, coques de noix usagées (WS), vides), une partie de l'onde est réfléchiée et une partie est transmise et par conséquent sa vitesse diminue. De plus, une fois les granulats grossiers remplacés par des particules de coques de noix usagées (WS), l'UPV diminuerait car l'UPV est fonction de la fraction volumique des composants du béton et de leurs propriétés élastiques. Les valeurs de UPV pour les mélanges avec un rapport coques de noix usagées (WS) supérieur à 35% en volume indiquent que la qualité du béton est moyenne (ASTM C136 / C136M-14, 2009).

Conclusion

Sur la base des résultats de cette étude, les conclusions suivantes ont été tirées : [76]

- La résistance à la compression du béton auto plaçant diminue avec l'ajout des particules de coques usagées (WS). La plus petite valeur est de 26 MPa pour un mélange avec 50% de volume de coques de noix usagées (WS), ce qui est présente la limite minimale de résistance à la compression pour le béton léger selon ASTM(2004).
- La densité à l'état frais et durci du béton auto plaçant diminue avec l'introduction des particules de coques de noix usagées (WS). Ce béton léger est obtenu pour les mélanges contenant un rapport de coques de noix usagées (WS) égal ou supérieur à 35% en volume.
- Les valeurs UPV de béton auto plaçant diminue avec l'ajout de particules de coques de noix usagées (WS). Ces valeurs indiquent que ce béton a une bonne qualité pour le mélange de référence et les mélanges qui contiennent moins de 40% de volume de coques de noix usagées (WS). Alors que le béton auto plaçant des autres mélanges avec coques de noix usagées (WS) supérieur ou égal à 40% de volume a une qualité moyenne selon leurs valeurs UPV.
- Les résultats obtenus montrent évidemment que le rapport de volume optimal de coques de noix usagées (WS) est de 35% pour obtenir un béton auto plaçant léger avec des propriétés à l'état frais et durci appropriées. Ainsi, la production de béton auto plaçant léger (SCLWC) durable peut être atteinte grâce à cette étude récente qui peut économiser environ 35% des agrégats naturels grossiers et réduire le poids des structures de SCLWC.

En Mars 2019, une étude faite par Tayyib Cheboub et al, sur le thème : propriétés d'ingénierie d'un mortier léger auto compactant respectueux de l'environnement contenant des coquilles de grains d'olive comme agrégat, dans le cadre de cette étude ont utilisé les matières premières suivantes [77]:

- ciment Portland CEM II / B 42.5N qui est conforme à NA 442 (2003) et EN 197-1 (2011).
- Déchets solides de coquilles de noyaux d'olive (COK) ont été récupérés dans un moulin à huile situé à Ain-Merane Wilaya de Chlef. Après avoir séparé la pulpe de l'amande d'olive broyée (COK)coque, le matériau COK a été lavé à l'eau chaude puis séché dans une étuve à 40 ° C pendant une période de 48 heures.L'analyse granulométrique a été réalisée suivant une méthode conventionnelle procédure, à l'aide de tamis et conforme à la norme EN 933-2 (1996). Ces déchets les particules appartiennent à la classe granulaire 0/4
- Sable est un mélange composé de 60% de sable de carrière (0/4) et 40% de sable marin de Terga.
- Le super plastifiant est de type Viscocrète tempo 12, selon NF EN 934-2(2002).

Préparation descomposites

Tayyib Cheboub et al ont tenté de réutiliser le sous-produit de l'olive pour la production d'un mortier léger auto compactant, pour l'utiliser comme substitut partiel au sable naturel. Il s'agit d'une substitution volumique réalisée dans les proportions de 0, 25, 50, 75 et 100% de particules COK (**Tableau III.10**).

Tableau III.18. Formulation de divers mortiers composites [77].

Matériaux composites	Ciment (g)	Sable naturel (% V)	ROK (% V)	W / C	SP (%)	Épandage (%)	Time Vfunnel (s)	Densité fraîche kg /m ³
SCM0	650	100	00	0,42	0,55	25,3	2,18	2323
SCLM25	650	75	25	0,42	0,55	24,2	2,83	1936
SCLM50	650	50	50	0,42	0,60	26	4,00	1818
SCLM75	650	25	75	0,42	0,65	26,5	7,44	1592
SCLM100	650	00	100	0,42	0,80	26,5	16,16	1430

Les essais réalisés sur cesmortiers

Propriétésmécaniques

Après 3, 7, 28, 62 et 91 jours de durcissement, des essais destructifs ont été effectués afin d'examiner l'évolution des résistances à la compression et à la flexion à partir de l'écrasement des éprouvettes (4x4x16) cm³ suivant les recommandations de la norme EN 196- 1 (2005).

Test de vitesse d'impulsionultrasonique

Le principe de ce test consiste à mesurer la vitesse des ondes au sein des différents composites, à l'aide d'un instrument de mesure ultrasonique PunditLab, comme décrit dans la norme ASTM C597-02 (2002) à 28 jours. Plus le module d'élasticité n'est élevé, c'est-à-dire plus la résistance du composite est élevée, plus la vitesse sera élevée.

Porosité accessible à l'eau

La mesure de la porosité accessible à l'eau a été réalisée selon la norme ASTM C 642 (2006). Cette méthode consistait à déterminer le volume de pores accessible à l'eau. La porosité a été déterminée comme le rapport du volume total des pores au volume total de l'échantillon.

Absorption

L'absorption est une caractéristique macroscopique intrinsèque des matériaux poreux ; il est utilisé dans l'étude de la durabilité des matériaux de construction. Le test d'absorption a été réalisé sur des échantillons secs (40x40x50) mm³. Les échantillons ont été préconditionnés conformément aux recommandations de la procédure d'essai AFGC-AFREM (1997).

Conductivité thermique

La conductivité thermique λ (W/m.K) caractérise la capacité d'isolation thermique d'un matériau. Plus le matériau est isolant, plus le coefficient λ sera faible. Les propriétés thermiques des différents échantillons de mortier auto compactant ont été déterminées à l'aide de l'appareil ISOMET Quickline (QTM 30). Cet instrument de mesure utilise la procédure décrite dans la norme ASTM D5930 (2001). La conductivité thermique " λ " ainsi que la diffusivité thermique " a " ont été mesurées pour chacun des 3 prismes de dimensions (4x4x16) cm³ pour les différents échantillons aux délais de 3, 7, 28, 62 et 91 jours.

L'analyse de la microstructure

La microstructure a été étudiée en utilisant la microscopie électronique à balayage (MEB). L'analyse s'est concentrée sur l'interface matrice-agrégat et a été réalisée avec le microscope électronique à balayage FEI Quanta 250 avec filament de tungstène.

Résultats et discussion

Résistance mécanique à la compression

La Figure III.14 représente l'évolution des résistances à la compression des SCLM testés à 3, 7, 28, 62 et 91 jours en fonction du pourcentage de particules COK incorporées.

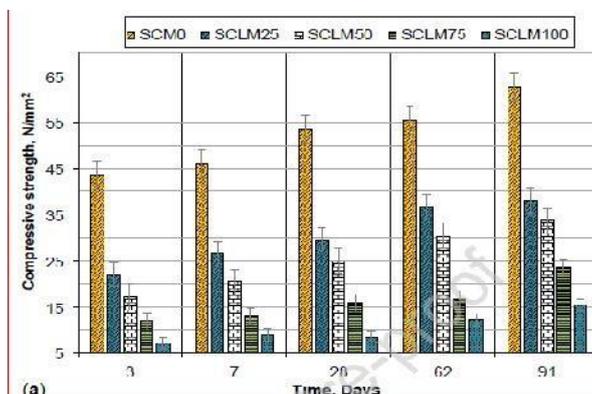


Figure III.45. Evolution des résistances à la compression de différents mortiers En fonction de l'âge [77].

La figure III.14 montre clairement que plus le taux de substitution des particules de COK sont élevé dans les mortiers auto compactant, plus la résistance à la compression des composites mortier-COK n'est faible. En effet, la perte de résistance à la compression des SCLM25, SCLM50, SCLM75 et SCLM100, à 91 jours, était respectivement de 39, 46, 63 et 75% inférieure à celle du mortier de contrôle SCM0. La réduction de la résistance peut être attribuée aux propriétés physiques et géométriques des particules COK ; cela devrait générer des faiblesses locales dans la matrice de ciment. De plus, sa capacité d'absorption d'eau élevée augmente la quantité d'air occlus à l'état frais et conduit donc à la formation d'une porosité supplémentaire à l'état durci.

Résistance mécanique à la flexion

Les variations de la résistance à la traction des mortiers en fonction du temps et du taux de substitution des particules de COK sont représentées sur la **Figure III.15**. Il convient de noter que les remarques faites sur la résistance à la traction sont presque similaires à celles notées sur la résistance à la compression ; là aussi, il y a une diminution de la résistance à la traction. Ce comportement se poursuit à mesure que le taux de substitution des déchets COK augmente.

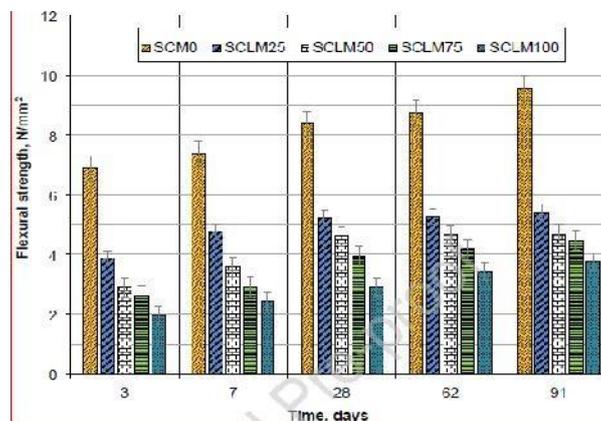


Figure III.46. Evolution des résistances à la traction en flexion des mortiers En fonction de temps

La diminution de la résistance à la flexion en fonction du taux de substitution est en accord avec les résultats de Traoré et al. (2017) et Sathiparan et De Zoysa (2018), trouvés dans la littérature. Il est intéressant de noter que malgré la perte de performance mécanique des particules de COK contenant du SCM, ces composites peuvent être employés dans des applications spécifiques, telles que la production de blocs et chapes de ciment dans lesquels les propriétés mécaniques ne sont pas d'une grande importance.

Observations au microscope optique

Des observations microscopiques de mortiers durcis avec et sans particules de COK sont présentées sur la figure III.16.

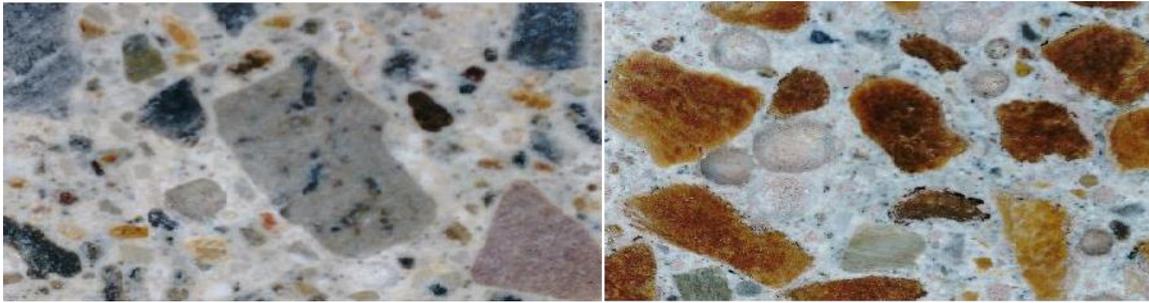


Figure III.47. Observations microscopiques des mortiers durcis

Notez que le mortier de référence SCM0 a une matrice compacte (Figure III.16). En revanche, les observations microscopiques de mortiers durcis SCLM75 contenant 75% de COK révèlent l'existence d'un réseau de bulles d'air avec une très large gamme de dimensions. Cependant, les mortiers végétaux semblent avoir une porosité beaucoup plus élevée, et cela est probablement dû à la présence de particules COK.

Test de vitesse d'impulsion ultrasonique - Isolationacoustique

Les résultats des tests UPV des composites contenant différents pourcentages de particules COK et leur classification selon la norme IS, 13311-1 (1992) sont donnés dans la **Figure III.17**.

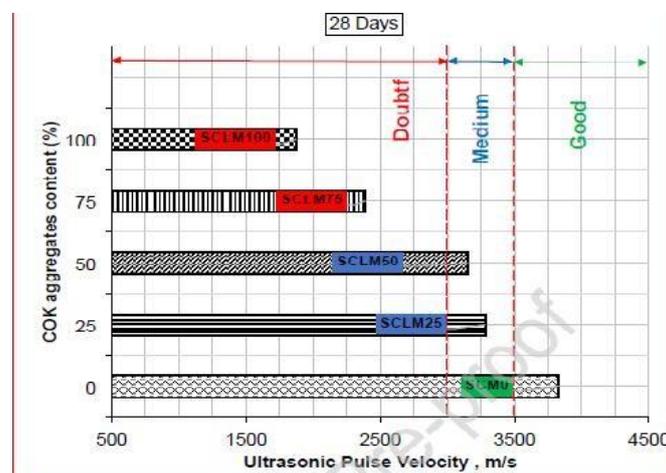


Figure III.48. Résultats des tests UPV des composites contenant différents pourcentages de particules COK

Il convient de noter que les valeurs des UPV des composites de mortier contenant des particules de COK diminuent à mesure que le taux de substitution des particules de COK augmente, après 28 jours de durcissement. Ces valeurs sont inférieures de 14, 18, 38 et 51% pour les composites SCLM25, SCLM50, SCLM75 et SCLM100, respectivement, à celles du

SCM0. Le retard de propagation des ondes ultrasonores peut cependant être attribué à la texture des particules COK et également à la porosité de la matrice de ciment.

Absorption capillaire des composites de mortier à base deCOK

Il s'agit d'un paramètre caractéristique macroscopique intrinsèque des matériaux poreux ; il est généralement utilisé pour étudier la durabilité des matériaux de construction. L'absorption capillaire représente la capacité d'un matériau à absorber l'eau par capillarité. Les résultats de l'absorption capillaire des échantillons après une immersion de 24 heures dans l'eau (la figure III.18).

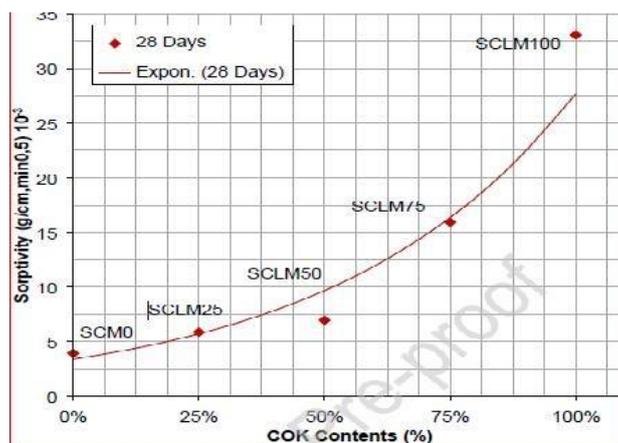


Figure III.49. Les résultats de l'absorption capillaire des échantillons après une immersion de 24 heures dans l'eau [77].

Les résultats obtenus indiquent que l'absorption augmente à mesure que le taux de substitution des particules de sable par les particules COK augmente. Parmi tous les mortiers étudiés, seuls les mortiers SCLM75 et SCLM100 ont montré une augmentation significative de l'absorption capillaire par rapport au SCM0 mortier de référence. Les mortiers SCLM25 et SCLM50 sont restés dans la même plage de valeurs. En effet, après 24 heures d'immersion dans l'eau, le coefficient d'absorption était respectivement de 4,956 g/cm², 5,869 g/cm² et 6,951g/cm² pour les mortiers SCM0, SCLM25 et SCLM50. Il est intéressant de mentionner que cette augmentation d'absorption est probablement due au caractère hydrophile des particules de COK, ainsi qu'à la quantité incorporée dans la matrice de ciment.

Conductivité thermique en fonction de la teneur enCOK

La conductivité thermique est une grandeur physique qui caractérise le comportement des matériaux lors du transfert de chaleur par conduction. L'évolution de la conductivité thermique en fonction de la teneur en particules COK est représentée graphiquement sur la figure III.19.

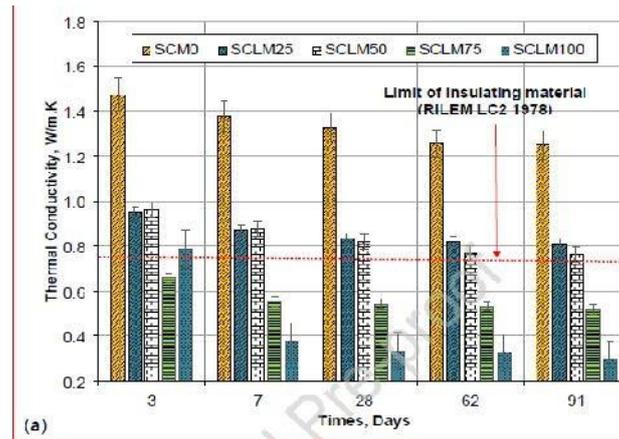


FIGURE III.50. L'évolution de la conductivité thermique en fonction de la teneur en particules COK

Les résultats obtenus montrent que la conductivité thermique diminue à mesure que la teneur en COK augmente, pour tous les âges. Cependant, pour les mortiers SCLM25, SCLM50, SCLM75 et SCLM100, la conductivité thermique diminue respectivement de 35%, 39%, 59% et 77% par rapport à celle du mortier de référence SCM0. Ces résultats semblent être en accord avec les observations rapportées dans la littérature par (Belhadj et al. 2016 ; Magnions, 2010 ; Panesar et Shindman, 2012) [78] La tendance généralement citée dans la littérature suggère que la conductivité thermique du matériau cimentaire diminue à mesure que sa densité diminue (Magniont, 2010 ; Morsy, 2011)[79].

Conclusion

D'après les résultats de cette étude, les conclusions suivantes peuvent être tirées : [77]

- ✓ Les particules COK peuvent réduire le poids des mortiers auto compactant (SCM) de 38% par rapport au mortier de référence.
- ✓ Le remplacement du sable naturel par des agrégats COK a permis de réduire les résistances à la compression et à la traction. Cependant, la résistance à la compression reste dans la plage autorisée pour les constructions légères. De plus, il est intéressant de mentionner que jusqu'à 75% de taux de substitution, les valeurs de résistance restent supérieures à 15 MPa. Il est à noter que, selon les recommandations RILEM (RILEM LC2, 1978), ces mortiers peuvent être utilisés dans la production d'éléments structuraux.
- ✓ L'introduction d'agrégats COK dans le mortier auto compactant augmente à la fois la porosité et le coefficient d'absorption d'eau, mais réduit les valeurs UPV. Ces mortiers peuvent être recommandés pour une utilisation lorsque des matériaux de construction intérieurs légers avec une meilleure isolation acoustique sont nécessaires.

- ✓ L'incorporation de particules COK dans les mortiers auto compactant améliore considérablement leur conductivité thermique (0,294 W/m.K), ce qui favorise leur utilisation comme matériaux pour l'isolation thermique.
- ✓ Tayyib Cheboubet Yassine Senhadji, Hamid Khelafi, Gilles Escadeillas suggèrent que ces nouveaux mortiers peuvent être utilisés pour fabriquer des chapes isolantes légères avec de meilleures caractéristiques que celles faites avec du mortier traditionnel.



Conclusion Générale

Conclusion générale

Le béton léger connu depuis plus que 25 ans dans le monde, avec le développement du domaine de la construction, en raison du manque d'agrégats poreux naturels et de leur existence dans la plupart des pays développés, des recherches sur la fabrication d'agrégats légers ont commencé. Rappelons que l'objectif de ce mémoire est de faire une étude sur les caractéristiques physico-mécaniques sur les mortiers et bétons légers. En effet, les propriétés physiques (porosité, légèreté) des granulats légers rendent la résistance à la compression et à la flexion inférieure à celles du béton ordinaire ainsi réduisent la masse volumique et le poids. L'utilisation d'agrégats de liège et de polystyrène nous permet de produire un béton avec une densité inférieure à celle du béton ordinaire. De plus, l'incorporation d'une grande quantité de liège et de polystyrène produit un béton léger, mais il a une résistance à la compression et une faible propriété de flexion par rapport au béton ordinaire. Et dans ce contexte, une étude réalisée par Maelson M. et al [74], sur le thème : développement et classification d'agrégats légers à partir de boues d'épuration et de cendres de balle de riz, cette étude montre que, l'utilisation des cendres de balle de riz (RHA) s'avère bénéfique pour la fabrication des granulats légers (LWA). La surface spécifique élevée et la faible quantité de matière organique dans les RHA soutiennent les gains de résistance et l'absorption d'eau réduite. La teneur élevée en SiO_2 présente dans la RHA a facilité l'obtention de mélanges à composition chimique extensible.

D'après une autre étude réalisée par Tayyib Cheboub et al, dans le but de mettre en place un mortier léger auto-compactants respectueux de l'environnement contenant des coquilles de grains d'olive (COK) comme agrégat. Les particules COK peuvent réduire le poids des mortiers auto-compactant (SCM) de 38% et le remplacement du sable naturel par des agrégats COK a permis aussi de réduire les résistances à la compression et à la traction. L'incorporation de particules COK améliore considérablement leur conductivité thermique (0,294 W/m.K), ce qui favorise leur utilisation comme matériaux pour l'isolation thermique.

Pour obtenir un béton auto-plaçant léger avec des propriétés à l'état frais et durci appropriées, il faut que le rapport de volume optimal de coques de noix usagées (WS) soit de 35%.

La recherche expérimentale sur béton léger additionné de déchets industriels (déchets d'acier) a montré que l'ajout de déchets d'acier améliore considérablement les propriétés mécaniques du béton léger. Les déchets d'acier ont un effet très significatif sur les propriétés de traction et de flexion par rapport à la propriété de compression. Cette méthode est économique qui permet aussi d'améliorer les propriétés mécaniques et de réduire la pollution.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] Véronique CERESO (2005) : Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique. Thesedoctoratesat, INS àLyon.
- [2] FRANÇOIS TOUTLEMONDE et JACQUES RESPLENDINO WILEY, Les bétons : formulation-fabrication et mise en œuvre, Tome 2, Collection Technique CIM Béton. Centre d'information sur le béton et ses applications, Paris, 2013.
- [3] Herihiri.O (2010), « Formulation et Caractérisation des Bétons Légers », mémoire de Magistère université de Biskra, Algérie.
- [4] Agoumimelcha A et Ouannoughi B, 2017: mémoire « Formulation et caractérisation d'un béton léger à base de granulats obtenus par recyclage desboues de barrage»2016/2017.]
- [5] B. BENKHALFA: «contribution a l'étude des bétons légers d'argile expansée pour des éléments armés préfabriqués».Thèse de magistère. Université d'Annaba.1988.
- [6] F. Michaud, ''Rhéologie de panneaux composites bois/thermoplastiques souschargement thermomécanique : Aptitude post formage'' thèse Phd, univ Laval, 2003.
- [7] HAMRI Amel Influence des fibres sur la résistance et la rupture l'effort tranchantdes éléments de structures 06 /06 /2015.
- [8] Idem, Ecole d'Avignon, P198-199.
- [9] V.Vorobiev, « Matériaux de construction ». Édition. Mir, Moscou 1967. P249.
- [10] SYLVER.P <<science des matériaux>>, université pierre et marie curie 2005,2006.
- [11] GCI712 « Durabilité ET réparation du béton », département Génie civil, Université deSherbrooke-Canada, Avril2009.
- [12] R.DUPAIN, R.LANCHON, J-C.SAINT-ARROMAN <<Granulat, sols, ciment et béton>> EditionCASTEILLA-PARIS-2004
- [13] WILLIAM.D, CALLISTER.JR « Science et génie des matériaux » modulo Editeur,2001
- [14] BELHADJ NaimaModélisation du comportement du béton de fibres par lamécaniquede l'endommagement. 2015
- [15] G. DREUX & J. FESTA : «Nouveau guide du béton et de ses constituants». 8ème Édition. Eyrolles. Mai1998.
- [16] Matériaux de construction≥ par une réunion d'ingénieur 1979-eyrolles
- [17] A. NEVILLE : «Propriétés des bétons». Eyrolles. Paris,2000.

- [18] M.CONTANT: «Confection de bétons légers la fabrication d'éléments architecturaux». Projet d'application présenté à L'école de technologie supérieure. Ecole de technologie supérieure L'université du Québec Édition. Montréal 14 Avril2000.
- [19] AC I213R-03, guide for structural lightweight-aggregate concrete, Reported by AC Committee 213, American Concrete Institute,2003, pp 1-38.
- [20] "Béton léger", TECHNI.CH-Rapport technique / domaine du bâtiment - génie-civil contenu, Janvier2014.
- [21] Madani BEDERINA, " Caractérisation Mécanique Et Physique Des Bétons De Sables A Base De Déchets De Bois", Thèse De Doctorat En Génie Civil, De L'université De Laghouat, 25 Avril2007.
- [22] LesdossiersdebinettesetJardin,consultéle25MARS2019enligne,disponiblesur <<<https://jardinage.lemonde.fr/dossier-2286-beton-cellulaire.html>>>.
- [23] NARAYANAN.N and RAMAMURTHY.K, Structure and proprieties of Aerated concrete; a review: cement and concreteresearch. 22(2000), pp. 321-329.
- [24] SFBC «Mémento du béton cellulaire » Eyrolles juin 2005France.
- [25] M.SHINK, «Compatibilité élastique, Comportement mécanique et optimisation Des béton de granulats légers». Université Laval Québec Avril2003.
- [26] Benmalek. M.L, Derbala .R. (9-11février 2009) : Elaboration et caractérisation d'un béton à base de sable dunaire et de sous-produits industriels ; université de Skikda et Guelma (Algérie).
- [27] Bing Chen, Juanyu Liu (2004): Properties of lightweight expanded polystyrene concrete reinforced with steel fiber .Cement and Concrete Research34.pp.1259-1263.
- [28] JOHN.L.CLARKE, «Structural lightweight Aggregate Concrete» Edited by Chief Structural Engineer British Cement Association Crowthorne First Edition1993
- [29] Latifou Bello «Méthodologie de formulation des Bétons Auto-Plaçant Légers »2015.
- [30] Jean-Pierre lott« Le béton, matériau de structure d'expression architecturale».
- [31] Roger la croix-Albert Fuentes(1982):Traité de béton Armé; Editions Eyrolles,Paris.
- [32] Gotteicha.M, (2005). Contribution à la Caractérisation des bétons de sable à base des Copeaux de bois traités, Thèse de Magister, U.A.T deLaghouat
- [33] G.Bauduin, DJ Mathieu et R.Phan tan Luu(1987) : Mise au point d'un nouveaubéton.
- [34] A. Steopoe 1970: "La durabilité du béton", Eyrolles,Paris.
- [35] A.Laukaitis, R.Zurauskas, J.Keiene (2005): The effect of foam polystyrene granules on Cément composite properties ; Cementconcrete composite 27(2005) pp.41-47.

- [36] J.P Yvrard(1998) : Expérimentation et modélisation du comportement Mécanique du Polystyrène expansé. Thèse de doctorat de l'université deLille.
- [37] DJAKAM .I: «Elaboration d'un béton léger à partir des Matériauxlocaux»2015/2016.
- [38] Thèse doctorat « caractérisation du comportement mécanique des bétons de granulats légers : expérience et modélisation »2008.]
- [39] Zitouni .M : « Etude des propriétés physico-mécaniques des composites écologiques applications sur les bétons allégés par les billes de PSE et les grains de liège »2018/2019].
- [40] Zhang .M-H &Gjorv .O-E; Caractéristiques des granulats béton légers pour une résistance élevée béton, ACI Materials Journal; 88 (2), 1990. pp. 150-158.
- [41] LAOUDB:article«Caractérisationmécaniqueetphysique d'unbétonlégeràbasede sable calcaire et des granulats de liège» en 2013.
- [42] S. MOHELLEBI : « Caractérisation et Modélisation des paramètres physico-hygro-mécaniques d'un béton léger à base de granulats composites », Thèse doctorat 29 Mai 2014.
- [43] MémoiredeMagistèreW.Laidi&N.BenYahia:élaborationd'uncompositeabase de granulats légers 2014/2015.
- [44] Arnould.MEtVirlogeux.M.«Granulats et bétons légers»Pressedel'écolenationale des ponts et chaussées, Paris, 1986
- [45] K. MILLED:«Effet de taille dans le béton léger de polystyrène expansé». Thèse de Doctorat. L'école Nationale Des Ponts Et Chaussées. 21 Novembre2005.
- [46] A.Nefzaoui.Contributionàlarentabilitédel'oléicultureparlavalorisationoptimaledes sous-produits. Tunisie. (1987, Janvier)
- [47] Y.Tiab, R.Slimani :« Caractérisation physico-chimique du grignon d'olive ». Mémoire de fin d'étude. Université de Bejaia.2002.
- [48] R.K.B.Derriche.Valorization of olive oil cake by extraction of hemicelluloses.Journal of FoodEngineering (78), pp. 1149-1154.(2007)
- [49] F. B.Maurizio Canetti. therlaldegradationbehaviour of isotactic polypropylene blended with lignin. Polymer Degradation and Stability (91), pp. 494-498.(2006).
- [50] Thermodurcissable H. Boussehel. ETUDE DES MOYENS DE STABILISATION DES COMPOSITES A BASE DE POLYSTYRENE.(2018).
- [51] A.A.B. Viksne. A comparison of compounding processes and wood type for wood fibre—PP composites. Composite(2005).

- [52] RAZAFINDRAINIBE Raphaël Nantenaina. Huile de palme et huile de palmiste: Etudes antérieures, contribution à un essai de valorisation de la matière grasse. Mémoire de fin d'étude, Département Industries Agricoles et Alimentaires, ESSA, 1983-1986.
- [53] SURRE Christian, ZILLER Robert. Le palmier à huile, N° 242. Paris : Maisonneuve et Larousse, 1963 ; 225 p. <http://www.plantapalm.com>.
- [54] Y. Traore. « Propriétés mécaniques d'un béton de granulats légers à base de coques de Noix de palme traitées ». Rencontres Universitaires de Génie Civil, May 2015, Bayonne, France, pp. 452-460.
- [55] Johnson Alengram, Baig Abdullah AlMuhitetMohdZamin bin Jumaat (U. Johnson Alengram, 2013).
- [56] Yasmine TRAORE, Adamah MESSAN, prince-Agbodjan, W., Tsobnang, F., 2017 experimental investigation on the physical and mechanical properties of a lightweight concrete using oil palm shell as coarse aggregate. J. Mater. Sci and engineering A 7(3), pp.157-168.
- [57] Yang Ke (2008) : Caractérisation du comportement mécanique des bétons de granulats légers (expérience et modélisation); Thèse de doctorat de l'université de Cergy-pontoise.
- [58] MAHIOUT Soraya, Mettre en valeur ou bannir le polystyrène - Approche dans un cadre de développement durable, thèse de doctorat, université SHERBOCK, 2014].
- [59] Yves J ANNOT (12-18/11/08): Métrologie thermique .Séminaire PER AUF, LEA Dakar].
- [60] Site : «Chahine Products», Comment fabrique-t-on le polystyrène expansé, consulté en ligne le 30 Avril 2019, «<https://www.chahineproducts.com/Le+polystyrene>» La pré expansion des perles à l'aide de la vapeur.
- [61] Mémoire de Génie Civil Laghouat : Effet du type de liant sur les propriétés physico-mécaniques et thermiques d'un béton allégé par les billes de polystyrène (Polys-béto), Mai 2017, réalisé par Belkacem ZIREGU et ABAHKhaled.
- [62] Mémoire de Génie Civil Biskra : « Formulation et caractérisation des bétons légers », 2010, réalisé par HERIHIRIOued.
- [63] Chafi, N. Matrice cimentaire renforcée de fibres ; thèse de magistère, Constantine (2005).
- [64] Nassima Sotehi thèse doctorat 2010, Caractéristiques Thermiques des Parois des Bâtiments et Amélioration de l'isolation, Constantine.
- [65] Benazza -Bouregba M. (2017) : Inventaire et identification des basidiomycètes de la forêt de M'sila (Oran). Thèse de doctorat. Université AHMAD-BEN-BELLA Oran, Algerie, 259 pages.

- [66] PINTUS A. (2012). Les propriétés techniques du liège Intérêt pour la construction. Colloque International “Liège et éco construction”, 13-15 juin, Vivès. Agenzia Regionale per la Ricerca in Agricoltura.
- [67] Silva S. P., Sabino M. A., Fernandes E. M., Correlo V. M., Boesel L. F & Reis R. L. (2005) Cork: properties, capabilities and applications International Materials Reviews, VOL 50, NO6, (345-365).
- [68] Boulahia Hakima. (2016) : Etude du comportement physico-mécanique de nouvelle bio composite poudre de liège-PVC. Thèse de doctorat. Université M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES, Algérie, 150pages.
- [69] Messali S, 2003 : Le liège : histoire, transformation et utilisation. Alger : Ed. Jijel Liège Etanchéité. 7 p.(brochure).
- [70] Moreira A., Antonio J & Tadeu, A. lightweight screed containing cork granules: Mechanical and hygrothermal characterization. Cement and Concrete Composites. 49 (2014): 1-8. Elsevier.
- [71] Maalouf C, Boussetoua H, Moussa T, Lachi M, Belhamri A. (7-septembre- 2015) Experimental And Numerical Investigation Of The Hygrothermal Behaviour Of Cork Concrete Panels In North Algeria. Conference of International Building Performance Simulation Association, Hyderabad, India, Dec.
- [72] Ziregue Ahmed., Mouldi Khenfer Mohamed., Quéneudec-t'Kint Michèle & Montrelay Nicolas. (2016). Developmental potentiality of insulating lightweight concrete based on cork and calcareous sand. Journal of Adhesion Science and Technology, 30:9,934-946.
- [73] Boussetoua H., Maalouf C., Lachi M., Belhamri A & Moussa T. (2017) Mechanical and hygrothermal characterisation of cork concrete composite: experimental and modelling study, European Journal of Environmental and Civil Engineering, Taylor & Francis. DOI.10.1080/19648189.2017.1397551.
- [74] Case Studies in Construction Materials journal homepage: www.elsevier.com/locate/cscm Maelson M. Souzaa, Marcos A.S. Anjosa, Maria V.V.A. Sáa, Nathaly S.L. Souzaa, 2020, pp.1-12.
- [75] Materials Today: Proceedings journal homepage: www.elsevier.com/locate/matpr M. Kalpana, AhohTayu. 9 novembre 2019, pp.887-889.
- [76] Journal of King Saud University – Engineering Sciences journal homepage Nahla Naji Hilalet al. août 2019, pp.1-9.
- [77] Journal Pre-proof Investigation of the engineering properties of environmentally-friendly self compacting. Tayyib Cheboub et al. light weight mortar containing olive kernel shells as aggregate. mars 2019, pp.1-62.

[78] Panesar, D., Shindman, B., 2012. The mechanical, transport and thermal properties of Mortar and concrete containing waste cork. *Cem. Concr. Compos.* 34(9), pp. 982-992.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.06.003>.

[79] Magniont, 2010 ; Morsy, M.I.N., 2011. Properties of rice straw cementitious composite. darmstadt Université, pp. 147.