

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

جامعة -البليدة 1-

UNIVERSITE SAAD DAHLEB- BLIDA 1



Faculté de Technologie

Département de Génie civil

Laboratoire de Géo matériaux et Génie civil

MEMOIRE DE MASTER

Spécialité : Matériaux en Génie civil

THEME

PERFORMANCE DU BLOC DE BETON LEGER

Réalisé par

Boudjema Mohamed Salim et Bouzertit Chakib

Devant le jury composé de :

Dr. Hammat Sihem	U.S.D.B.1	Présidente
Dr. BENSACI Hamza	U.S.D.B.1	Examinateur
Dr. YAHIAOUI Walid	U.S.D.B.1	Promoteur
Pr. KENAI Said	U.S.D.B.1	Co-Promoteur
Mr. ZEROUBE Hamid	LAFARGE Algérie	Co-Encadreur

Blida, Juillet, 2023.

ملخص

إن حبيبات الطين الموسع معروفة بخفتها وعزلها الحراري والصوتي الممتاز. على الرغم من أن استخدامها لا يزال محدودًا. تعتبر الخرسانة المصنوعة من الطين الموسع أخف من الخرسانة التقليدية، بكثافة أقل من 2000 كجم / م³؛ على الرغم من قوتها الميكانيكية الأقل مقارنة بالخرسانة التقليدية، توفر الخرسانة المبنية على الطين العزل الحراري الممتاز.

هدف دراستنا إلى إنتاج نوع خاص من الكتل الخرسانية، وهو السقفية، والتي تُستخدم على نطاق واسع في الجزائر لألواح الضغط والتي تُعرف بجودتها الجيدة ولكن على حساب جودة العزل الحراري.

تركز دراستنا على نوع من الطين الخفيف الموسع، هو الطين الممدد المسحوق. كان الجزء الأول من دراستنا التجريبية هو تحديد خصائص المواد المستخدمة ثم إعداد عينات اختبار من الخرسانة الخفيفة عن طريق الاستبدال الكلي للكتل التقليدية بنسب مختلفة من الحصى والرمل المصنوع من الطين الموسع المتراوحة من 0% إلى 100%. الجزء الثاني من الدراسة تضمن تصنيع كتل مجوفة خفيفة باستخدام نفس التركيبات المستخدمة في العينات الاختبارية، ثم مقارنة خصائصها بخصائص الكتل المجوفة التقليدية. والقيام بدراسة فنية واقتصادية لإيجاد أفضل الصيغ.

أظهرت النتائج التجريبية أهمية استخدام حبيبات الطين الخفيفة الموسعة في تصنيع أجزاء الكتل المجوفة. تم الحصول على أفضل نتيجة من حيث قوة الضغط والتوصيل الحراري عند الصيغة 60%. تؤكد الارتباطات الموجودة بين الكثافة والخصائص الميكانيكية أهمية هذا النوع من حبيبات الطين الخفيفة.

الكلمات المفتاحية: خرسانة خفيفة الوزن، مجتمعات خفيفة الوزن، طين ممدد، عزل حراري، قوة ضغط، السقفية.

Résumé

Les granulats d'argile expansée sont réputés pour leur légèreté et leur excellente isolation thermique et acoustique. Bien que leur utilisation soit encore limitée. Les bétons à base d'argile expansée sont plus légers que les bétons traditionnels, avec une masse volumique inférieure à 2000 kg/m^3 ; En dépit de leur moindre résistance mécanique par rapport aux bétons traditionnels, les bétons à base d'argile expansée offrent une excellente isolation thermique.

Notre étude vise à la réalisation d'un type particulier de bloc de béton, à savoir les entrevous, ces blocs sont les plus utilisés en Algérie pour les planchers qui sont très bonne mais au détriment de l'isolation thermique.

Notre étude est focalisée sur un type de granulats légers d'argile expansé qui est l'argile expansée concassée, la première partie de notre étude expérimentale était de déterminer les caractéristiques des matières utilisées, puis la confection des éprouvettes de béton léger par la substitution totale des granulats traditionnels par différents pourcentages de gravier et de sable d'argile expansée, allant de 0% à 100%. La deuxième partie consistait à fabriquer des pièces hourdis légers en utilisant les mêmes formulations que celles des éprouvettes, puis à comparer leurs propriétés avec celles des hourdis traditionnels. Et faire une étude technique et économique afin d'identifier les meilleures formulations.

Les résultats expérimentaux montrent l'importance de l'utilisation des granulats légers dans la fabrication des pièces d'hourdis. Le meilleur résultat en termes de résistance à la compression et conductivité thermique a été obtenu pour la formulation de 60% d'argile expansée. Les corrélations trouvées entre la masse volumique et les caractéristiques mécaniques confirment l'importance des granulats légers.

Mots clés : béton léger, granulats légers, argile expansée, isolation thermique, résistance à la compression, hourdis.

Abstract

Expanded clay aggregates are known for their lightweight and excellent thermal and acoustic insulation properties, although their use is still limited. Concrete made with expanded clay aggregates is lighter than traditional concrete, with a density of less than 2000 kg/m³. Despite their lower mechanical strength compared to traditional concrete, clay-based concrete offers excellent thermal insulation.

Our study aims to create a specific type of concrete block, the "entrevous", which are widely used in Algeria for compression slabs known for their quality but lacking in thermal insulation.

Our study focuses on a type of lightweight expanded clay aggregate known as crushed expanded clay. The first part of our experimental study involved determining the characteristics of the materials used and making lightweight concrete test specimens by completely substituting traditional aggregates with different percentages of gravel and sand made from expanded clay, ranging from 0% to 100%. The second part involved manufacturing lightweight hollow blocks elements using the same formulations as the test specimens and comparing their properties with those of traditional floor joists. Additionally, we conducted a technical and economic study to identify the most effective formulations.

The experimental results show the importance of using lightweight aggregates in the manufacture of hollow blocks parts. The best results in terms of compressive strength and thermal conductivity were obtained for the 60% expanded clay formulation. The correlations found between density and mechanical properties confirm the importance of lightweight aggregates.

Keywords: lightweight concrete, lightweight aggregates, expanded clay, thermal insulation, compressive strength, hollow block.

Remerciements

Tout d'abord, nous tenons à remercier ALLAH le tout-puissant de nous avoir donné la santé, la volonté, le courage et la patience d'effectuer nos stages et le courage pour accomplir ce modeste travail.

Nous exprimons toute notre gratitude au Docteur Yahiaoui Walid, notre promoteur, pour nous avoir proposé ce sujet et pour sa motivation professionnelle, ses conseils avisés et ses critiques constructives. Nous tenons aussi à remercier Pr.KENAI Said pour son encadrement, à sa confiance, à son soutien incessant.

Un grand merci aux membres du jury d'avoir accepté d'examiner notre travail.

Nous tenons surtout à exprimer nos vifs remerciements à nos encadrants Mr. Hamid Zeroub et Mr. Ouldache Ouramdane e ; leur précieux soutien et leur collaboration ont été d'une importance capitale tout au long de ce parcours. Ainsi que Mr. Dahakoumiane Rafik et toute l'équipe du CDL LAFARGE ALGERIE qui ont précieusement contribué au bon déroulement de notre stage et ce, avec leur assistance permanente.

Nous remercions également Mr. Koubi Housseyn et Mr. Feniche Tarek et toute l'équipe du laboratoire contrôle technique GICA (MEFTAH) pour leurs bons accueils et leurs servitudes.

Nous exprimons également notre gratitude envers M. Djelloul Noureddine et toute l'équipe de l'usine ALGEXPAN qui ont mis à nous disposition des produits nécessaire pour l'élaboration de notre travail de recherche.

Et bien évidemment un grand merci à notre enseignante Madame Meguenni, pour ses aides et conseils, et à tous les profs que nous avons croisés durant notre cursus au sein du département de Génie Civil de l'Université Saad Dahleb Blida -1- . Nous remercions également les techniciens pour leur disponibilité et toute l'équipe de laboratoire de Géo-matériaux et de génie civil. Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à Elnouri Tassnim et Belkermi Rania pour leur collaboration exceptionnelle en tant qu'équipe.

Nous les remercions enfin, particulièrement nos très chers parents et familles, qui ont toujours été là pour nous, pour leurs aides et disponibilités ainsi pour leurs encouragements.

TABLE DES MATIERES

ملخص.....	2
Résumé.....	3
Abstract.....	4
Remerciements.....	5
TABLE DES MATIERES.....	6
LISTE DES TABLEAUX.....	10
LISTE DES FIGURES.....	12
LISTE DES ABREVIATIONS.....	15
Introduction générale	17
Introduction.....	17
Problématique.....	18
CHAPITRE1 : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	20
1.1 Introduction.....	20
1.2 Les granulats légers.....	20
1.2.1 Définition d'un granulats léger.....	20
1.2.2 Processus de fabrication de granulats légers.....	20
1.2.3 Adhérence entre les granulats légers et la pâte cimentaire.....	20
1.2.4 Granulats légers d'argile expansée et leurs propriétés.....	21
1.2.4.a. Définition.....	21
1.2.4.b. Processus de fabrication d'argile expansée.....	22
1.2.4.c. Composition chimique.....	26
1.2.4.e. Propriétés mécaniques.....	27

1.2.4.f. Propriétés thermiques.....	27
1.2.4.g. L'argile expansée en Algérie (Présentation de l'usine « ALGEXPAN »).....	28
1.3. Les bétons légers.....	29
1.3.1. Classification des bétons légers	30
1.3.1.a. La densité et la résistance	30
1.3.1.b. La méthode de fabrication	31
a. Béton d'argile expansée	34
b. Béton de schiste expansé.....	34
c. Béton de cendres volantes frittées.....	34
d. Béton de perlite.....	35
e. Béton de pierre ponce.....	35
f. Béton à la sciure de bois	35
g. Béton à base de scories	36
1.3.1.c. L'utilisation des bétons légers (usage)	39
1.3.3. Propriétés des bétons légers à l'état frais	40
1.3.3.a. Consistance	40
1.3.3.b La masse volumique à l'état frais	41
1.3.4. Propriétés des bétons à l'état durci	41
1.3.4.2.a. Propriétés mécaniques	41
1.3.4.c. Propriétés élastiques	49
1.3.4.d. Retrait	50
1.3.4.e. Propriétés thermiques	51
2. Conductivité thermique.....	52
1.3.4.f. Propriétés acoustiques.....	54
1.3.5. Aspects économiques de l'utilisation de béton à base des granulats légers	54
1.3.6. Domaines d'utilisation des bétons légers	55

1.4. L'hourdis	55
1.4.1. Définition.....	55
1.4.2. Formulation des pièces du hourdis	56
1.4.3. Avantages de l'hourdis à base d'argile expansée	57
1.5. Conclusion.....	58
CHAPITRE 2 : MATERIAUX ET ESSAIS	59
2.1. Introduction du chapitre	59
2.2. Caractéristiques des matériaux	59
2.2.1. Le ciment.....	59
2.2.3. Les granulats utilisés.....	62
2.3 Formulation des béton:.....	66
2.3.1. Confection et conservation des éprouvettes pour essais de résistance.....	67
2.3.2. Essais sur béton a l'état frais	68
2.3.3. Essais sur béton a l'état durci	68
2.4. Récapitulatif du programme des essais	70
CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSIONS.	73
3.1. Introduction	73
3.2. Essais à l'état frais	73
3.2.1. La masse volumique fraiche	73
3.3. Essais à l'état durci	75
3.3.1. La masse volumique à l'état durci	75
3.3.2. La résistance à la compression	78
3.3.3. La conductivité thermique.....	82
3.3. Corrélation.....	83
a. La relation entre la masse volumique fraiche et la résistance à 28jours	83

b. La relation entre la masse volumique durcie et la résistance à 28jours des éprouvettes	84
c. La relation entre la masse volumique durcie des hourdis et leurs résistances à la compression.....	85
d. La relation entre la masse volumique durcie des hourdis et des éprouvettes durcies du béton.....	85
e. La relation entre la masse volumique des éprouvettes et leurs conductivités thermiques	86
3.4. Étude technique et économique des hourdis formulés.....	87
3.4.1 Etude comparatif.....	88
3.5. Conclusion.....	89
Conclusion générale	91
Annexe 1 : Essai analyse chimique par XRF	93
a. Détermination de la perte au feu	93
b. Analyse chimique XRF	94
Annexe 2 : Fiche technique pour l'hourdis à base des granulats légers	96
Annexe 3 : Calcul économique d'hourdis.....	99
Exemple 1 « Formulation FT traditionnelle » : 40% Sable 0/4 + 60% Gravier 3/8....	99
Exemple 2 « Formulation F60 légère » : 40% Sable 0/4 + 60% Gravier 3/8	100
Bibliographie.....	103

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1: Propriétés d'argile expansée.	26
Tableau 1.2: Classification des bétons légers selon le guide ACI 213R-87.....	31
Tableau 1.3: Propriétés du béton sans fines produit en utilisant des granulats de poids normal et des granulats légers.....	37
Tableau 1.4: Caractéristiques comparées des bétons cellulaires.	38
Tableau 1.5: Influence de l'argile expansée sur la résistance à la compression du béton. .	43
Tableau 1.6: Propriétés du béton des mélanges sans et avec granulats d'argile expansée. .	45
Tableau 1.7: Résistances à la compression des mélanges de béton.....	46
Tableau 1.8: Résistance à la traction pour différents mélanges.....	47
Tableau 1.9: Coefficient de dilatation thermique des bétons confectionnés avec des granulats légers.	51
Tableau 1.10: Conductivité thermique en fonction de la masse volumique après séchage à l'étuve pour les bétons à base d'argile expansée.	52
Tableau 1.11: Dimensions d'un bloc du hourdis.....	57
Tableau 2.1: Composition chimique du ciment.	59
Tableau 2.2: Propriétés physiques du ciment.	60
Tableau 2.3: Début et fin de prise du ciment.....	60
Tableau 2.4: Résistance à la compression et à la flexion du ciment.....	61
Tableau 2.5: La masse volumique des granulats et leur taux d'humidité.	62
Tableau 2.6: Masse volumique absolue et coefficient d'absorption des granulats.....	63
Tableau 2.7: Essai équivalent de sable et bleu de méthylène.....	63
Tableau 2.8: Module de finesse des sables.....	64
Tableau 2.9: Coefficient d'aplatissement des graviers.....	65

Tableau 3.1: La masse volumique fraiche des différents types de béton.....	74
Tableau 3.2: Les différentes masses volumiques à l'état durci.....	75
Tableau 3.3: Masse volumique durcie des différents hourdis.	77
Tableau 3.4: Résistance à la compression des bétons.....	79
Tableau 3.5: Résistance à la compression des hourdis.	81
Tableau 3.6: La conductivité thermique des différentes formulations.....	82
Tableau 3.7: Coût et taux de casse des différentes formulations.....	88
Tableau 3.8: Tableau récapitulatif des résultats.	89

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1: Extraction.....	22
Figure 1.2: Dépôt après concassage.....	23
Figure 1.3: Façonnage.....	23
Figure 1.4: Le four rotatif.....	25
Figure 1.5: Machine à criblage.....	25
Figure 1.6: Granulats d'argile expansée.....	28
Figure 1.7: Photo du site et logo de l'usine d'argile expansée.....	28
Figure 1.8: Les différentes fractions.....	29
Figure 1.9: Schéma représentatif des différentes classes de béton léger.....	30
Figure 1.10: Gamme de masse volumique réelle sèche des bétons légers avec différents types de granulats légers.....	31
Figure 1.11: Représentation schématique des différents types de béton léger.....	32
Figure 1.12: Bloc de béton des granulats légers.....	33
Figure 1.13: Bloc de béton à base d'argile expansée.....	34
Figure 1.14: Bloc du béton caverneux.....	36
Figure 1.15: Blocs des bétons cellulaires.....	39
Figure 1.16: Les types de béton léger selon l'usage.....	39
Figure 1.17: Relation entre la masse volumique fraîche et la résistance des bétons.....	41
Figure 1.18: Relation entre la masse volumique sèche et la résistance à la compression des bétons.....	42
Figure 1.19: Résistance à la compression pour différentes gradations de granulat léger ..	43
Figure 1.20: Résistance à la flexion du béton léger.....	49

Figure 1.21: Relation entre la résistance à la compression et le module d'élasticité pour les bétons de granulats d'argile expansée et le béton conventionnel.	50
Figure 1.22: Conductivité thermique des bétons à base des différents types des granulats légers.....	53
Figure 1.23: Plancher avec des hourdis en béton.....	Error! Bookmark not defined.
Figure 1.24: Le rôle de l'hourdis sur le plancher (dalle de compression)	58
Figure 2.1: Ciment SARIE 52.5N.....	59
Figure 2.2: Courbe de la chaleur d'hydratation du ciment SARIE.....	61
Figure 2.3: Courbes granulométriques pour les différents granulats utilisés.	64
Figure 2.4: Eprouvettes des différents bétons.....	68
Figure 2.5: Dispositif de l'essai de compression des éprouvettes.....	69
Figure 2.6: Dispositif de l'essai de compression des pièces du hourdis.	69
Figure 2.7: Dispositif de l'essai de la conductivité thermique.	70
Figure 2.8: Organigramme récapitulatif des essais.	71
Figure 2.9: Organigramme des différentes formulations.	72
Figure 2.10: Organigramme des essais sur les bétons.....	72
Figure 3.1: Masse volumique fraîche.....	74
Figure 3.2: Les différentes masses volumiques à l'état durci.	76
Figure 3.3: Masses volumiques durcies des hourdis.....	77
Figure 3.4: La résistance à la compression des bétons.....	79
Figure 3.5: Résistance à la compression des différents hourdis.	81
Figure 3.6: Conductivité thermique des différents bétons.....	83
Figure 3.7: Relation entre la masse volumique fraîche et la résistance à la compression des éprouvettes du béton.....	84
Figure 3.8: Relation entre la masse volumique durcie des éprouvettes et la résistance à la compression.	84

Figure 3.9: Relation entre la masse volumique durcie des hourdis et leur résistance à la compression.	85
Figure 3.10: Relation entre la masse volumique durcie des hourdis et la masse volumique durcie des éprouvettes.	86
Figure 3.11: Relation entre la masse volumique et la conductivité thermique des différents types de béton.....	86
Figure 3.12: Schéma représentatif des différents aspects influents sur la pièce d'hourdis.	87

LISTE DES ABREVIATIONS

BGL : Béton des granulats légers.

GL : Granulats légers.

AC : Argile expansée.

C : Ciment.

E/C : Rapport eau sur ciment.

R_b : Résistance à la compression de béton.

R₂₈ : Résistance à la compression à 28jrs.

ES : Equivalent de sable

VB : Valeur au bleu de méthylène.

ρ : Rho, La masse volumique.

λ : lambda, symbole de la conductivité thermique.

SSB : Surface spécifique Blaine.

PAF : Perte au feu.

XRF : X-ray fluorescence.

Introduction générale :

Introduction :

Dans notre pays, les habitants, en particulier après l'indépendance, encouragent activement les constructions en béton (poteaux-poutres- dalles). Pour obtenir des environnements intérieurs thermiquement confortables dans ce type populaire d'ouvrages, la climatisation et le chauffage sont indispensables dans les bâtiments, la dépendance aux systèmes de chauffage et de climatisation pour améliorer la qualité de vie de l'homme s'explique par les pertes de chaleur en hiver et les températures extrêmement élevées de l'été, qui peuvent atteindre 46°C en Algérie. À cause de ça, La question des économies d'énergie dans cette construction est d'actualité. Des recherches ont été engagées pour arriver aux résultats escomptés, pour trouver les formules dressant un rapport fiable qualité prix sans pour autant affecter la résistance et la durabilité des matériaux.

Dans ce contexte les chercheurs aux files des années ont développé de nouveau type de béton confectionné avec des agrégats légers (naturel ou artificiel) qui présentent une masse volumique inférieure à 2000 kg/m³. Ces bétons reprennent la principale caractéristique des bétons traditionnels qui est la résistance mais en conférant d'autres caractéristiques comme la légèreté et aussi l'isolation thermique et acoustique et la résistance au feu, ces bétons se ferrant connaitre sous le nom de bétons légers.

L'une des catégories de ce type de béton est le béton de granulats légers. L'argile expansée est l'un des types de granulats légers artificiels les plus connus au monde à cause de sa faible densité et son supérieure isolation thermique. L'utilisation de ce matériau dans la composition du béton permet de réduire les sections des éléments structuraux, les dimensions des fondations, ainsi que la quantité des armatures nécessaires.

En Algérie une seule usine qui produit les granulats légers industriels à base d'argile expansée. L'usine se trouve à Bouinane dans la wilaya de Blida. Elle produit des granulats légers variés en taille et en granulométrie. Ces granulats sont peu utilisés en raison de la méconnaissance des caractéristiques et des avantages des granulats légers. Les granulats légers peuvent être utilisés non seulement dans des applications structurelles comme les dalles et les éléments structuraux pour alléger le poids de la structure, mais aussi dans des

applications non structurelles comme les hourdis et les panneaux de façade pour l'isolation thermique.

L'hourdis (désigné également par le terme entrevous), l'un des éléments secondaires les plus utilisés dans ce pays, c'est un élément de remplissage associé à des poutrelles en béton qui représente le corps creux du plancher béton. Il est largement utilisé et nécessite une préparation particulière.

Problématique :

- Le poids de l'hourdis lourd crée des inconvénients pour la construction. Lorsque le poids de l'hourdis est important, la section des armatures est grande (beaucoup de ferrailage), et la quantité de béton est élevée, les dommages causés par les séismes sont importants, parce que le poids de la dalle est grand.
- En raison de la croissance démographique en Algérie, de demande de construction rapide des bâtiments avec une conductivité thermique élevée, la consommation d'énergie en Algérie a augmenté. L'augmentation de l'isolation thermique des bâtiments réduit cette consommation et garantit un environnement intérieur confortable.
- En termes de la nouvelle stratégie et vision de l'état algérien de promouvoir la production locale les ingénieurs ont pour obligation d'introduire et de développer des matériaux de construction révolutionnaire qui répondent aux exigences du secteur.

Le présent travail s'inscrit dans le cadre de l'utilisation des granulats légers d'argile expansée fabriqués localement, pour la confection d'un élément préfabriqué qui combine les avantages du hourdis traditionnel avec les propriétés isolantes de l'argile expansée, et qu'il offre une réduction de poids tout en améliorant l'isolation thermique et acoustique.

Ce mémoire est composé de 3 chapitres, dont le premier est consacré à une synthèse bibliographique sur les granulats légers, leurs caractéristiques, le béton léger et sa performance à l'état frais et durci, et l'hourdis et ses avantages ; et une présentation sur l'entreprise de fabrication des granulats légers d'argile expansée en Algérie « ALGEXPAN ». Le deuxième chapitre présente la caractérisation des matériaux utilisés et les procédures expérimentales à l'état frais et durci sur les différentes formulations. Le

chapitre 3 présente les expositions des différents résultats obtenus et interprétation de chaque essai.

Enfin, une conclusion générale, des annexes et des recommandations pour des futurs travaux sont donnés.

CHAPITRE 1 : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

PROPRIETES ET CARACTÉRISTIQUES DES BETONS LEGERS ET GRANULATS LEGERS.

1.1 Introduction :

Ce chapitre présente une revue bibliographique sur les granulats légers et les blocs de bétons légers, ainsi que sur les facteurs qui affectent les propriétés et les performances des bétons légers, à la l'état frais et durci.

1.2 Les granulats légers :

1.2.1 Définition d'un granulats léger :

Les granulats légers sont des granulats ayant après séchage à l'étuve, une masse volumique réelle inférieure ou égale à 2000 kg/m³ et une structure poreuse ; peuvent être des granulats naturels qui n'ont subi que des modifications mécaniques, des granulats légers artificiels résultant d'un procédé industriel comprenant des modifications thermiques ou granulats légers par traitement de sous-produits industriels. [1]

1.2.2 Processus de fabrication de granulats légers :

La plupart des procédés de fabrication d'agrégats légers, à l'exception des procédés utilisant du laitier de haut fourneau, ont été limités à l'utilisation d'une chaîne de frittage ou d'un four rotatif. La chaîne de frittage est préférée lorsque les granulats frais avant cuisson sont de forme appropriée. Le four rotatif produit la particule la plus arrondie avec la surface la plus imperméable lorsque la forme du granulé frais est cohésive et que sa forme peut être maintenue. [2]

1.2.3 Adhérence entre les granulats légers et la pâte cimentaire :

L'interface se caractérise par une interconnexion mécanique combinée à une réaction chimique de type pouzzolanique. En raison de la surface poreuse des agrégats légers, une partie du liant pénètre dans ces agrégats, réduisant la zone d'eau de saignement interne. Une couche de laitance se forme lorsque l'eau de saignement transporte une quantité importante de particules de ciment. Si cette couche de laitance se trouve en surface, elle

entraînera une faible porosité, ce qui peut provoquer une surface poussiéreuse. Les agrégats légers, en raison de leur porosité, réduisent la zone interne d'eau. [3]

1.2.4 Granulat léger d'argile expansée et leurs propriétés :

Il existe différents types de granulats légers naturels et artificiels. Pour notre étude, nous nous focaliserons exclusivement sur l'argile expansée.

1.2.4.a. Définition :

L'argile expansée, On l'appelle aussi LIAPOR (porous lias clay), faire pousser des roches ou des hydro cornes. Ce type d'agrégat léger est produit dans de nombreux pays (plus de vingt pays) avec divers noms de produits. Des pays particuliers produisent du l'argile expansée avec une méthode à peu près similaire, tels que le Royaume-Uni, l'Iran, le Portugal, la Finlande, l'Allemagne, l'Italie, le Danemark et la Suisse, l'ont appelé «leca», tandis que la Suède, la Chine, la Pologne et la Russie l'ont appelé «Keramzite». L'Espagne l'a qualifié de «liapour», tandis que l'Afrique du Sud l'a appelé «Argex». L'argile expansée est un matériau polyvalent qui est fabriqué à partir d'une argile plastique spéciale (avec une teneur en chaux faible ou négligeable) qui est cuite à haute température dans un processus de fabrication spécifique. La légèreté remarquable de ce granulat artificiel est due à la présence de nombreux espaces aériens distincts à l'intérieur et entre les agrégats. Pour cette raison, il est fréquemment utilisé dans la fabrication de blocs de béton légers. [4]

D'après Rashad [4] l'argile expansée est constituée de granules arrondis qui, une fois cassés, révèlent une texture vésiculaire. Dans la plupart des cas, l'argile expansée présente des couleurs brun foncé, rougeâtres, brun rouge ou grises. Des couleurs jaunes ou noires sont également disponibles. Ces différences de couleurs peuvent être associées aux variations de la composition chimique de l'argile expansée et à sa méthode de fabrication. L'argile expansée peut avoir différentes tailles (de 0,1 à 25 mm), adaptées aux agrégats fins, aux agrégats grossiers ou aux deux. L'argile expansée présente de nombreuses densités apparentes en vrac variant de 250 à 710 kg/m³, principalement en fonction de sa taille. L'argile expansée a une forme presque semblable à une pomme de terre ou ronde en raison du mouvement circulaire du four. À l'intérieur des particules d'argile expansée, il y a des trous de différentes tailles qui sont principalement interconnectés. D'autres types d'argile expansée ont des structures et des géométries différentes.

Ce granulat léger est utilisé dans de nombreuses applications différentes. Par exemple, dans le domaine de la construction, il peut être largement utilisé dans la production de blocs légers, de béton préfabriqué ainsi que pour le remblaiement structurel contre les fondations.

Dans le domaine du traitement de l'eau, ce granulat léger peut être utilisé comme agent d'imbibition pour éliminer le fluoranthène, le phénanthrène et le pyrène de l'eau. L'argile expansée peut être utilisée dans le domaine de l'horticulture ou de l'agriculture pour le traitement des eaux usées agricoles, pour lesquelles ce type de granulat a montré une grande capacité à éliminer de nombreux polluants présents dans les eaux usées agricoles, tels que la demande chimique en oxygène, les matières en suspension totales, les polyphénols, l'azote, les pesticides et les produits pharmaceutiques. De plus, il peut réguler la pression des eaux souterraines en drainant les eaux de surface et souterraines. [4]

1.2.4.b. Processus de fabrication d'argile expansée :

Selon les informations obtenues auprès l'usine ALGEXPAN le processus de fabrication de granulats légers d'argile expansée se déroule en plusieurs étapes :

1. L'extraction et le stockage :

L'argile et le schiste sont extraits dans des endroits où ils sont abondants et sont transportés vers un lieu de stockage à l'aide de différents moyens de transport.



Figure 1.1: Extraction.

2. Concassage, broyage et malaxage :

L'argile est concassée et broyée pour obtenir une farine crue de petite taille. Cette farine est mélangée avec de l'eau pour obtenir une pâte homogène.



Figure 1.2: Dépôt après concassage.

3. Le façonnage :

Cette étape consiste à façonner la pâte dans des moules spéciaux en forme de billes d'un diamètre de 10 à 20mm. Si nécessaire, la forme peut également être façonnée à la main pour atteindre le diamètre souhaité.



Figure 1.3: Façonnage.

4. La cuisson :

La cuisson est la phase la plus importante de la fabrication des granulats légers d'argile expansée. Elle se déroule en deux phases distinctes.

Le préchauffage des granulats : Tout d'abord, on met les billes d'argile crue au four rotatif à 400°C. Cette étape passe nécessairement par la phase de durcissement de l'argile expansée. En effet, elle y prend sa propriété plastique qui est déjà perdue lors de malaxage. En outre, la quantité de l'eau restant dans ce matériau est suffisamment importante pour assurer leur dureté.

La phase de cuisson et d'expansion : Ensuite, les granulats sont cuits à une température de 1200°C pendant 1h30 dans un four rotatif pour obtenir des billes d'argile expansée. Cette cuisson provoque une augmentation de volume des grains et une vitrification de la surface extérieure du matériau en raison de la cristallisation des silices et des alumines. Cette étape est cruciale pour la formation de la structure alvéolée des granulats.

Les argiles à propriété d'expansion doivent contenir

- Au moins 25% d'alumine.
- Environ 5 à 8 % d'oxyde de fer.
- Moins de 6% d'oxyde d'alcalin.
- Riche en silice (supérieur à 40 %).



Figure 1.4: Le four rotatif.

5. Refroidissement et criblage :

Après la cuisson, les billes d'argile expansée sont refroidies pour durcir complètement le matériau et éviter qu'il ne fonde. Enfin, les granulats sont tamisés et criblés pour obtenir des 4 classes de granulométrie différentes.

Les granulats légers d'argile expansée ainsi obtenus ont des propriétés d'isolation thermique et acoustique remarquables, une faible densité et une grande stabilité dimensionnelle, ce qui les rend adaptés à une variété d'applications dans la construction.



Figure 1.5: Machine à criblage.

1.2.4.c. Composition chimique :

L'agrégat d'argile expansé est une substance légère, inerte et sans substances nocives avec un pH naturel de près de 7 ; il ne s'abîme pas dans l'eau, il est imperméable à l'humidité, il est incombustible, non biodégradable et non décomposable dans des conditions difficiles. La silice (SiO_2), l'alumine (Al_2O_3), l'hématite (Fe_2O_3) sont les trois composés majoritaires avec CaO et quelques alcalis comme Na_2O et K_2O . SiO_2 représente généralement entre 53,3 % et 70 % de la composition totale, Al_2O_3 varie de 15,05 % à 27 %, Fe_2O_3 est entre 1 % à 14,3 % et CaO varie de 0,2 % à 3,92 %. [4]

1.2.4.d. Propriétés physiques :

Tableau 1.1: Propriétés d'argile expansée. [5]

Propriété	Densité apparente lâche (Kg/m³)	Densité apparente compactée (Kg/m³)	Densité relative	Absorption d'eau (%)	Résistance (MPa)
Valeur	613	1068	1.15	12.3	6.8

Selon le Tableau 1 [5], la densité relative des granulats d'argile expansée est de 1,15. La densité de ces granulats est de 20 à 45 % inférieure à celle des granulats typiques, avec l'augmentation de la température de cuisson, les valeurs de densité relative diminuent. L'absorption d'eau des granulats légers d'argile expansée est une propriété importante qui joue un rôle important dans le dosage des mélanges de béton. L'absorption élevée de l'agrégat est due à sa nature poreuse [6].

Lorsque la taille du granulat augmente, la densité apparente du granulat diminue, ce qui entraîne une réduction de la résistance du granulat. Le volume de pâte nécessaire pour une matrice de béton et donc la richesse et l'économie du mélange sont déterminés par la densité apparente des granulats [5].

1.2.4.e. Propriétés mécaniques :

L'argile expansée a un module d'élasticité environ 0,57 à 2,31 GPa et de 2,66 à 6,27 GPa. Le module d'élasticité et la masse volumique des particules d'argile expansée sont linéaires. L'augmentation de la taille des particules entraîne une diminution exponentielle du module d'élasticité.

L'équation permettant de déterminer le module d'élasticité des granulats légers en argile expansée a été introduite :

$$E_{GPa} = 8,96 p \text{ tonne/m}^3 - 3,78 \dots \text{ (Eq 1)}$$

Où p en tonne/m^3 : est la densité sèche des particules des granulats légers en argile expansée.

Les valeurs du module d'élasticité des granulats légers en argile expansée varient entre 243 kPa et 6,80 GPa en fonction du processus de production [2].

Les granulats d'argile expansée de petite taille ont montré une plus grande résistance à l'écrasement individuel que les granulats de grande taille. La valeur d'écrasement des granulats est d'environ 6,8 MPa, comme indiqué dans le tableau 1 [5]. Selon D William et al. [7], la porosité seule ne contrôle jamais la résistance à l'écrasement des granulats légers. La résistance à l'écrasement est influencée par plusieurs facteurs corrélés, notamment le changement de la composition minéralogique, la température de fusion des liants, la marge de densification pendant l'expansion, le gonflement de l'agrégat et les défauts internes causés par les contraintes thermiques.

1.2.4.f. Propriétés thermiques :

Les granulats légers résistent mieux au feu que les granulats ordinaires. Il s'agit de la capacité d'un matériau à résister à des températures élevées sans perdre sa capacité portante. L'argile expansée est un matériau incombustible qui ne brûle pas. [3]

La conductivité thermique d'argile expansée se situe généralement entre 0,09 et 0,12 W/mK, ce qui en fait des isolants très efficaces. En comparaison, les granulats traditionnels ont une conductivité thermique de 1 à 3 W/mK, mettant en évidence les propriétés supérieures d'isolation thermique des granulats d'argile expansée [4].



Figure 1.6: Granulats d'argile expansée.

1.2.4.g. L'argile expansée en Algérie (Présentation de l'usine « ALGEXPAN ») :

1. Présentation de l'usine « ALGEXPAN » :

L'usine de Bouinan, située dans la région de Blida en Algérie, est la seule usine en Algérie et en Afrique du Nord à produire des granulats légers manufacturés à partir d'argile expansée 100% algérienne. Elle est installée en hauteur et dispose d'un gisement d'argile à propriétés expansives. Les granulats obtenus par transformation thermique de l'argile sont à la fois poreux et résistants, offrant ainsi un équilibre parfait entre résistance et légèreté. De plus, la production d'un mètre cube de matière première permet de produire entre 2 et 3 m³ de matériaux de construction.



Figure 1.7: Photo du site et logo de l'usine d'argile expansée.

Le fonctionnement de l'usine est basé sur la transformation thermique de l'argile pour la transformer en pierre poreuse et résistante, sans l'utilisation d'additifs. Cette méthode permet la production de granulats légers qui sont utilisés dans la fabrication de béton léger et d'autres matériaux de construction.

L'organisation d'Algexpan est divisée en plusieurs départements, tels que la production, la qualité, la maintenance, la sécurité, les ventes et le marketing. L'entreprise emploie des professionnels expérimentés dans différents domaines pour assurer un fonctionnement efficace et une production de haute qualité. L'entreprise s'efforce également de respecter les normes environnementales en utilisant des techniques respectueuses de l'environnement pour la production de granulats légers.

2. Production de l'usine ALGEXPAN :

- Classe 0/3 mm (sable nodulaire).
- Classe 3/8 mm (petits granulats nodulaires).
- Classe 8/15 mm (granulats nodulaires).
- Classe 15/25 (granulats nodulaires).
- Classe 0/3mm (granulats concassés).
- Classe 3/8mm (granulats concassés).



Figure 1.8: Les différentes fractions.

1.3. Les bétons légers :

C'est un béton dont la masse volumique après séchage à l'étuve est inférieure ou égale à 2 000 kg/m³. Il est produit entièrement ou partiellement à partir de granulats légers [8].

1.3.1. Classification des bétons légers :

Le béton léger peut être classé en fonction de la densité et la résistance, La méthode de production, l'usage pour lequel il est destiné.

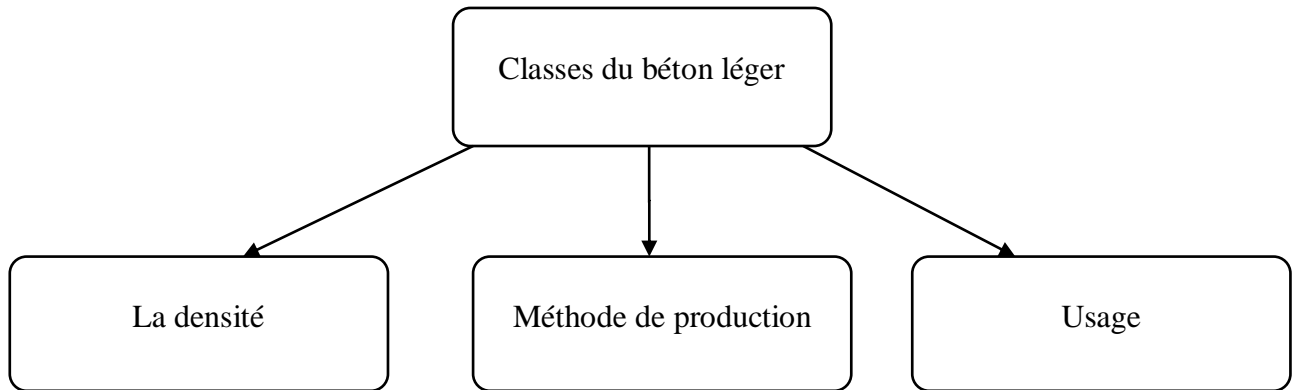


Figure 1.9: Schéma représentatif des différentes classes de béton léger.

1.3.1.a. La densité et la résistance :

Les différents types de béton léger peuvent être classés en fonction de leur densité et de leur résistance, comme suit :

Le béton à faible densité est léger : Ce béton a une valeur d'isolation thermique très élevée et une masse volumique inférieure à 800 kg/m^3 et est principalement utilisé pour l'isolation thermique. Sa résistance à la compression est faible, inférieure à 7 N/mm^2 .

Le béton léger avec une densité modérée : Un béton à une moyenne résistance à la compression. Il est parfois utilisé pour remplir des espaces et se situe entre le béton structural et le béton léger à faible densité. Sa valeur d'isolation thermique est intermédiaire et sa résistance à la compression est d'environ 7 à 17 N/mm^2 .

Le béton structural : Ce béton est utilisé pour renforcer les structures et est généralement composé de granulats provenant de schiste et d'argile expansée, d'ardoises, et de laitier. Un tel béton nécessite une résistance à la compression minimale de 17 N/mm^2 . En fait, la résistance à la compression de la plupart de ces bétons dépasse 34 N/mm^2 . [9]

Le guide ACI 213R-87 [10] classe les bétons légers en fonction de leur densité, qui est généralement inférieure à 2200 kg/m^3 .

Cette classification est présentée dans le tableau suivant :

Tableau 1.2: Classification des bétons légers selon le guide ACI 213R-87. [10]

Classification	La masse volumique (kg/m ³)	La résistance à la compression (MPa)
Béton de faible densité	300-800	<7
Béton léger de résistance modérée	800-1350	7 – 17
Béton léger de structure	1350-1900	> 17

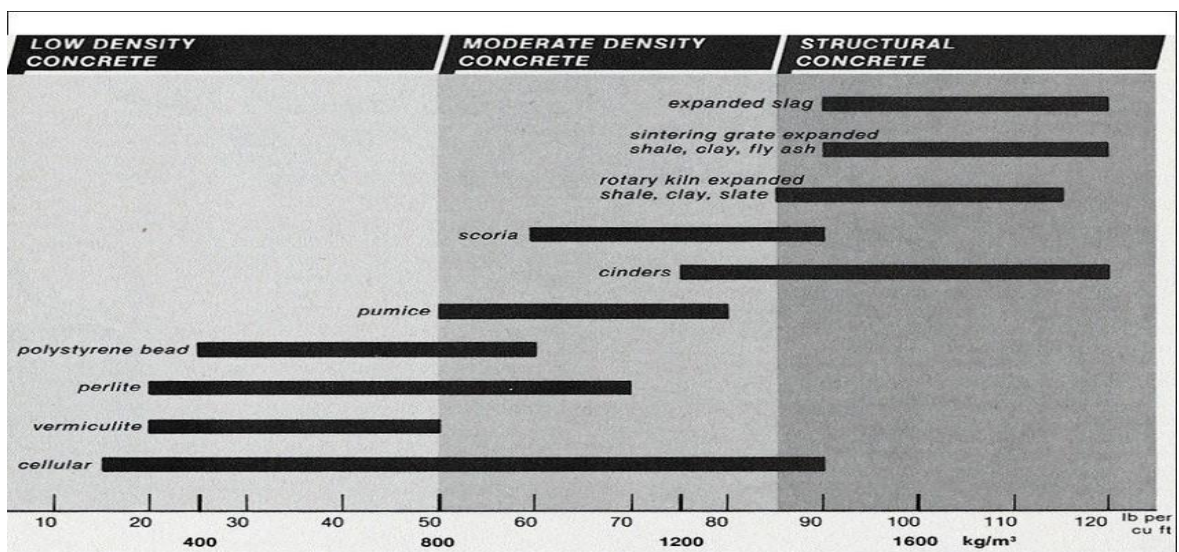


Figure 1.10: Gamme de masse volumique réelle sèche des bétons légers avec différents types de granulats légers. [1]

1.3.1.b. La méthode de fabrication :

Pour réduire la masse volumique du béton, il est possible de remplacer une partie du matériau solide par de l'air. Les trois méthodes courantes pour incorporer de l'air dans le béton sont les suivantes :

- À l'intérieur de la matrice (béton cellulaire).
- Entre les gros granulats (béton caverneux ou sans fines, c'est-à-dire sans sable).
- À l'intérieur des granulats (bétons à base de granulats légers). [11]

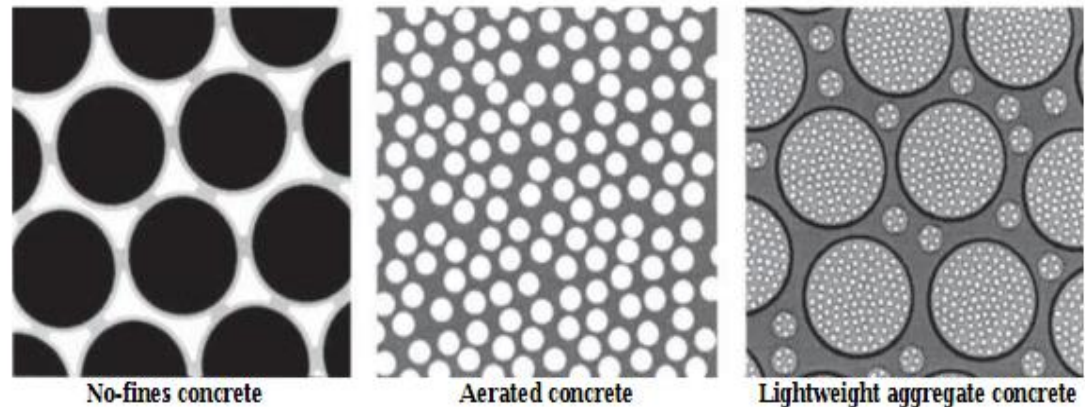


Figure 1.11: Représentation schématique des différents types de béton léger. [12]

1. Béton à base granulats légers :

Le béton de granulats légers est un type de béton qui utilise des granulats légers au lieu de granulats ordinaires. Les granulats légers sont des matériaux qui ont une densité inférieure à celle des granulats ordinaires, comme le sable et le gravier. Cela rend le béton de granulats légers plus léger que le béton ordinaire. [13]

Les granulats légers ont de nombreuses sources : des matériaux naturels tels que les schistes, les argiles, la pierre ponce, la diatomite, et les ardoises ou des matériaux artificiels (sous-produits) tels que le laitier de haut fourneau, l'argile, les cendres volantes frittées et le schiste.

Le béton de granulats légers est utilisé dans les structures pour réduire le coût global. Bien qu'il soit plus cher au mètre cube que le béton normal, le poids mort réduit et le coût de fondation inférieur peuvent compenser le coût initial. Le béton de granulats légers est utilisé dans une variété d'applications, y compris la maçonnerie en béton léger, le béton structurel léger et semi-léger coulé sur place, les éléments préfabriqués en béton à faible

densité, le remblai géotechnique à faible densité, le remblai en béton isolant, les tuiles en béton et ballast, couvre-sol et mélanges hors-sol. [13]

Les bétons légers pour les produits de structure présentent des masses volumiques réelles sèches comprises entre 1 200 et 2 000 kg/m³ et des résistances à la compression comprises entre 25 et 80 MPa. [1]



Figure 1.12: Bloc de béton des granulats légers. [4]

a) Domaine d'application de béton à base de granulats légers :

Dans la fabrication de granulats légers, une structure vésiculaire est produite, ce qui confère au béton des propriétés d'isolation thermique utiles. La résistance thermique du béton léger est jusqu'à six fois supérieure à celle du béton de poids normal. Le béton avec granulats légers est largement utilisé dans la construction en raison de sa faible densité. Ses avantages comprennent des économies sur les coûts de construction et d'entretien, des performances exceptionnelles. [2]

Le béton léger avec granulats (BGL) est un matériau de construction utilisé pour réduire le poids des immeubles de grande hauteur. Il offre des performances sismiques optimales et contribue à la durabilité de la construction, tout en réduisant les coûts globaux des projets de grande envergure. L'utilisation de sous-produits industriels et de déchets comme granulats dans ce béton permet de minimiser l'impact environnemental. [14]

b) Types de béton à base granulats légers :

Une multitude de classifications de béton à base de granulats légers, résultant d'une grande diversité de granulats légers. Les exemples incluent :

a. Béton d'argile expansée :

Le béton d'argile expansée est un type de béton léger qui utilise des agrégats d'argile expansée comme composant principal. L'argile expansée est un matériau léger et poreux fabriqué en chauffant l'argile dans un four rotatif. La chaleur provoque l'expansion de l'argile, créant ainsi un matériau léger et poreux utilisé dans la production de béton. Le béton à base d'argile expansée présente plusieurs avantages par rapport au béton traditionnel, notamment une meilleure maniabilité, une meilleure résistance au feu, une meilleure isolation acoustique et une meilleure isolation thermique. Cependant, son inclusion diminue la densité, la résistance, le module d'élasticité et la résistance à l'action du gel et dégel du béton. [15]



Figure 1.13: Bloc de béton à base d'argile expansée.

b. Béton de schiste expansé :

Le béton léger à base de granulats de schiste expansé est un type de béton fabriqué en utilisant des granulats de schiste expansé comme agrégats légers, avec un adjuvant réducteur d'eau à haute teneur en eau et un liant total. Il présente une bonne ouvrabilité, une résistance élevée et une faible densité, ce qui permet de l'utiliser dans les produits en béton préfabriqué, les structures légères et les immeubles de grande hauteur. [16]

c. Béton de cendres volantes frittées :

Le béton de cendres volantes frittées est fabriqué à partir de cendres volantes de charbon pulvérisées. Les cendres volantes constituent une excellente matière première pour la production d'agrégats légers en raison de leur disponibilité en grandes quantités et de leurs propriétés pouzzolaniques. Le béton de cendres volantes frittées peut atteindre des

résistances supérieures à 6 000 psi, et a été utilisé avec succès dans le béton structurel, le béton isolant et comme agrégat pour les éléments de maçonnerie. [17]

d. Béton de perlite :

Le béton de perlite est un béton de granulats légers qui offre de meilleures propriétés de réduction du bruit et d'isolation thermique que le béton conventionnel. Il n'est généralement pas adapté à des utilisations structurelles ou portantes, mais il offre de nombreux avantages au-delà de sa légèreté. Le béton de perlite est utilisé dans de nombreuses applications différentes, notamment le mortier de carrelage léger, les statues, les pierres décoratives, les bûches pour cheminées à gaz et les remplissages de sol. L'ajout de sable à un mélange perlite avec le ciment augmente la densité et la résistance à la compression. [18]

e. Béton de pierre ponce :

Le béton de pierre ponce est un agrégat léger qui se caractérise par une densité réduite, une meilleure isolation thermique et une meilleure résistance au feu, une perméabilité et un retrait plus faibles, une élasticité raisonnable et une structure poreuse [19]. Le béton de pierre ponce présente une résistance supérieure aux conditions climatiques difficiles telles que le gel et le dégel, ce qui le rend souhaitable pour les climats plus froids et les changements climatiques importants. [20]

f. Béton à la sciure de bois :

Le béton de sciure est un type de béton léger qui utilise de la sciure, un sous-produit de la transformation du bois, pour remplacer partiellement ou totalement les agrégats traditionnels tels que le sable. Il présente plusieurs propriétés uniques, notamment une densité plus faible, ce qui le rend idéal pour les applications où l'on souhaite réduire le poids. En outre, le béton de sciure de bois présente une meilleure isolation thermique et acoustique, ce qui améliore l'efficacité énergétique et l'adéquation avec les applications acoustiques.

Ses qualités d'absorption acoustique améliorées permettent de l'utiliser dans des applications acoustiques telles que les barrières et les panneaux acoustiques. Le béton de

sciure peut également être utilisé dans des éléments structurels tels que les poutres, les colonnes et les dalles, où la réduction du poids est avantageuse. [21]

g. Béton à base de scories :

Le béton léger à base de scorie est un type de béton spécialisé qui utilise de la scorie, une roche volcanique légère et poreuse, comme agrégat principal. Ce matériau unique offre plusieurs propriétés distinctes lorsqu'il est utilisé dans la production de béton. La résistance à la compression du béton léger à base de scories est inférieure d'environ 30 à 38 % à celle du béton traditionnel sans scories. Le béton léger à base de scories a une résistance à la traction par fendage de 3,65 à 3,4 MPa, tandis que son module d'élasticité diminue d'environ 42 % par rapport au béton traditionnel. Ces caractéristiques rendent le béton léger à base de scories adapté aux applications de construction légères, poreuses et modérément résistantes.

2. Béton caverneux (sans fines) :

Le béton caverneux est un type de béton léger qui se caractérise par l'absence de granulats fins tels que le sable. Il est composé de gros granulats, de ciment et d'eau. Il en résulte une structure poreuse avec des vides interconnectés, qui présente plusieurs avantages par rapport au béton conventionnel, tels qu'un meilleur drainage, un poids réduit et une conductivité thermique plus faible. [22]

Ce béton présente de grands vides interconnectés et uniformément répartis entre les particules de granulats. Ce béton drainant est fabriqué à partir de quantités soigneusement contrôlées d'eau et de matériaux cimentaires utilisés pour créer une pâte qui forme une couche épaisse autour des particules de granulats. [22].



Figure 1.14 : Bloc du béton caverneux. [22]

Le béton caverneux est caractérisé par une densité très faible : en raison de l'absence de granulats fins, ce qui le rend adapté aux applications où l'on souhaite réduire le poids de l'ouvrage.

Selon Arnould [3], la masse volumique des bétons sans fines fabriqués à partir de granulats de densité normale varie de 1600 à 2000 kg/m³; cependant, lorsque des granulats légers sont utilisés, cela peut descendre jusqu'à 640 kg/m³.

Il rend aussi la structure poreuse en améliorant le drainage et la perméabilité et il améliore la conductivité thermique.

Tableau 1.3: Propriétés du béton sans fines produit en utilisant des granulats de poids normal et des granulats légers [12]

Propriété	Agrégat normal	Agrégat léger
Rapport agrégats-ciment (en masse)	6-10	3-8
Rapport eau-ciment (par masse)	0.38-0.45	0.38-0.45
Densité sèche à l'air (kg/m³)	1200-1900	800-1400
Résistance cubique (MPa)	3-7	3-7 3-7

3. Bétons cellulaires :

Le béton cellulaire est un béton léger qui contient des bulles de gaz ou d'air. Le gaz ou l'air peut produire des vides. L'incorporation du gaz se fait généralement avec d'un agent expansif (poudre d'aluminium, agent moussant, entraîneur d'air.), ce qui crée une structure cellulaire qui réduit la densité du béton. [23] Le béton cellulaire léger est un

matériau poreux avec une densité typique allant de 300 à 1800 kg/m³, qui contient une structure homogène de bulles d'air dans le mélange. [24]

Le béton cellulaire est composé de chaux, de sable, d'eau et d'un agent expansif. La chaux réagit avec le sable et l'eau pour former des silicates de calcium hydratés (tobermorite) qui lient le matériau. L'agent expansif fait gonfler la pâte et forme des alvéoles pendant la fabrication.

En milieu alcalin, la poudre d'aluminium par exemple réagit comme suit :



La pâte se durcit en libérant de l'hydrogène qui forme des alvéoles. Ces alvéoles se vident de l'hydrogène et se remplissent d'air, ce qui en fait une bonne option pour les bâtiments situés dans des zones bruyantes.

Le béton cellulaire a de bonnes propriétés de durabilité, ce qui en fait une option durable pour les projets de construction. [24]

Tableau 1.4: Caractéristiques comparées des bétons cellulaires. [25]

Masse volumique sèche (kg/m³)	Résistance à la compression (MPa)	Résistance à la flexion (MPa)	Module d'élasticité (GPa)	Conductivité thermique (Jm/m²s°C)
450	3.2	0.65	1.6	0.12
525	4.0	0.75	2.0	0.14
600	4.5	0.85	2.4	0.16
675	6.3	1.00	2.5	0.18
750	7.5	1.25	2.7	0.20



Figure 1.15 : Blocs des bétons cellulaires. [26]

1.3.1.c. L'utilisation des bétons légers (usage) :

Le béton léger peut également être classé selon l'usage auquel il est destiné : on distingue le béton léger de structure, le béton utilisé dans les éléments de maçonnerie et le béton

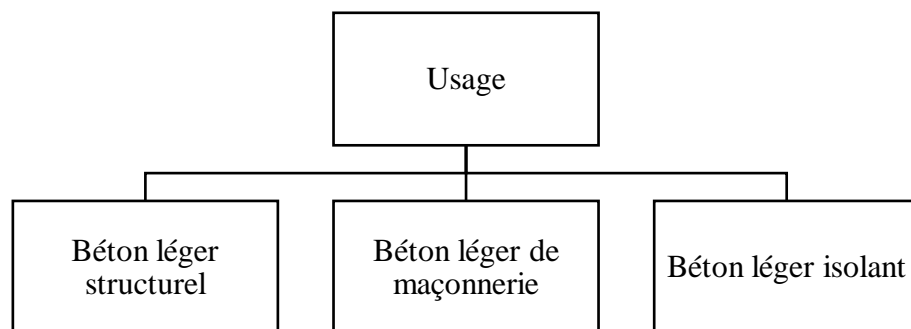


Figure 1.16: Les types de béton léger selon l'usage.

a. Béton léger structurel :

Le béton léger structurel à agrégat léger structurel. Ce béton a une résistance à la compression minimale de 17 MPa à 28 jours, une densité d'équilibre entre 1120 et 1920 kg/m³ et se compose entièrement d'agrégats légers ou d'une combinaison d'agrégats légers et normaux. Il peut être utilisé dans diverses applications, notamment la construction de bâtiments, les tabliers de pont et les produits préfabriqués en béton. L'agrégat structurel utilisé dans ce type de béton a une densité en vrac inférieure à 1120 kg/m³ pour les agrégats fins et inférieure à 880 kg/m³ pour les agrégats grossiers. [27]

b. Béton léger de maçonnerie :

Les bétons légers de maçonnerie sont des blocs de béton de construction constitués des mêmes agrégats légers utilisés pour le béton léger structuré tels que l'argile, la diatomite et le schiste, ayant généralement une densité comprise entre 500 et 800 kg/m³ et une résistance comprise entre 7 et 14 MPa. [28]

c. Béton léger isolant :

C'est un type de béton utilisé pour l'isolation. La caractéristique essentielle du béton isolant est son coefficient de conductivité thermique qui doit être inférieur à environ 0,3 J/m²s°C/m, alors que sa masse volumique est généralement inférieure à 800 kg/m³ et sa résistance comprise entre 0,7 et 7 MPa. [28]

Les granulats utilisés pour l'isolation sont les granulats non structuraux, la perlite avec une densité apparente comprise entre 120 et 192 kg/m³, la vermiculite avec une densité apparente comprise entre 88 et 160 kg/m³, les granulats structurels légers et les granulats légers pour maçonnerie. [27]

1.3.3. Propriétés des bétons légers à l'état frais :

Une propriété fraîche est un facteur crucial pour la production de béton, pris en compte lors du mélange, du transport, de la mise en place et de la finition, afin d'éviter la ségrégation. Elle est mesurée à l'aide d'un essai d'affaissement et d'autres tests. [14]

1.3.3.a. Consistance :

La consistance du béton dépend du type d'agrégat, de la quantité d'eau utilisée et de l'absorption des agrégats. En raison de ces facteurs variables, Il n'existe pas de méthode de contrôle unique de la consistance valable pour toutes les catégories des bétons légers. L'essai d'affaissement au cône d'Abrams peut être choisi selon les besoins spécifiques de chaque cas. Des auteurs ont remarqué que les valeurs d'affaissement mesurées avec les cônes d'Abrams ne sont pas comparables à celles des bétons normaux. [29]

L'essai d'affaissement au cône d'Abrams n'est pas significatif lorsqu'il s'agit de bétons légers, et ce à cause de la légèreté des granulats légers qui n'ont pas la même gravitation que les granulats ordinaires. [3]

1.3.3.b La masse volumique à l'état frais :

Ce type de béton possède deux densités différentes, à savoir la densité fraîche et la densité après démoulage. La masse volumique fraîche est la masse volumique du béton frais entièrement compacté. La masse volumique après démoulage est la masse volumique du béton, durci dans des conditions scellées pendant 24 heures. [30]

L'utilisation d'argile expansée dans du béton de poids normal permet de réduire tous les types de masse volumique par rapport au mélange de référence. [5]

1.3.4. Propriétés des bétons à l'état durci :

1.3.4.2.a. Propriétés mécaniques :

1- La résistance à la compression et la masse volumique :

D'après Benameur L [29] la masse volumique du béton et sa résistance à la compression sont deux des paramètres les plus importants du béton léger, La masse volumique du béton est déterminé principalement par la masse volumique granulaire des granulats. Le diamètre maximal du granulat et la granularité influence ces deux paramètres.

L'étude menée par R. Derradji et F. Demerdji [31] a observé dans les figures I.26 et I.27 que la résistance du béton léger est positivement corrélée à la masse volumique fraîche et sèche. Plus ces masses volumiques sont élevées, plus la résistance à la compression est élevée.

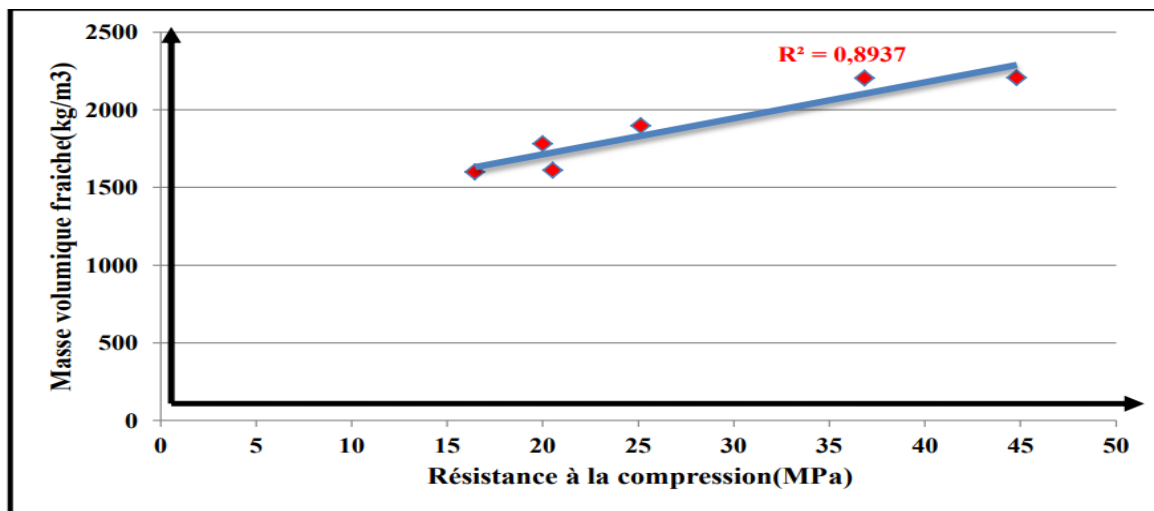


Figure 1.17 : Relation entre la masse volumique fraîche et la résistance des bétons. [31]

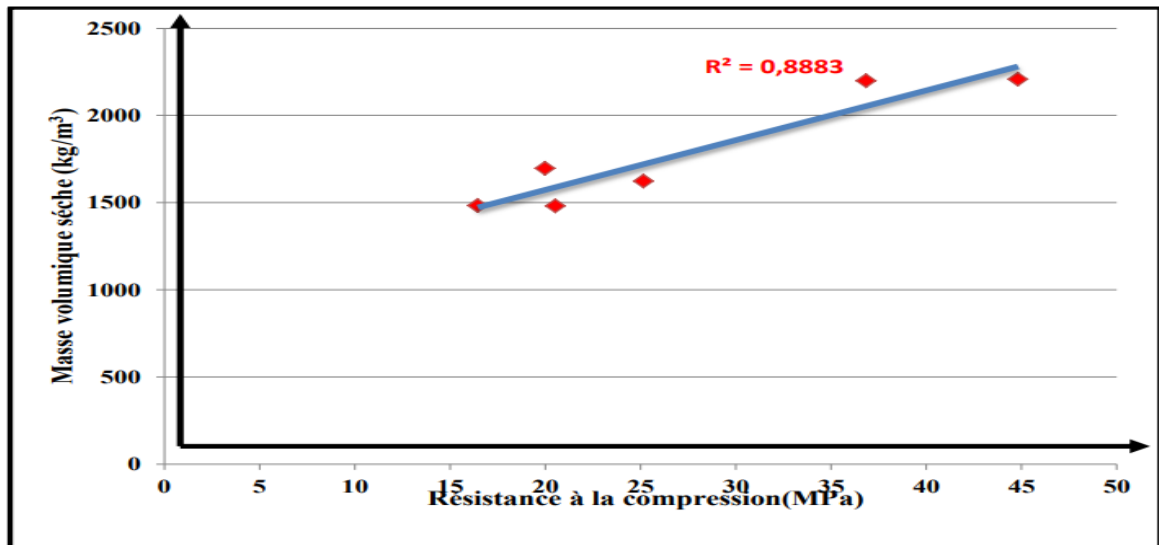


Figure 1.18 : Relation entre la masse volumique sèche et la résistance à la compression des bétons. [31]

Selon les recherches du Kyllastinen et al. [15] sur l'utilisation d'agrégats d'argile expansée de différentes tailles et fractions de 11.5% d'argile expansée pour tous mélanges. Les résultats de résistance à la compression montrent que la taille des agrégats a un effet sur la résistance à la compression, et un mélange avec une taille de (0-2 mm) a une résistance à la compression maximale, mais un mélange avec une taille de (2-8 mm) a une résistance à la compression plus faible. La figure I.28 montre la résistance à la compression avec différentes fractions.

La présence de granulats légers dans les mélanges 2, 3 et 4 semble avoir un effet négatif sur la résistance à la compression du béton par rapport au mélange de référence. Cela peut être attribué à des facteurs tels que la densité réduite et la porosité élevée des agrégats légers utilisés.

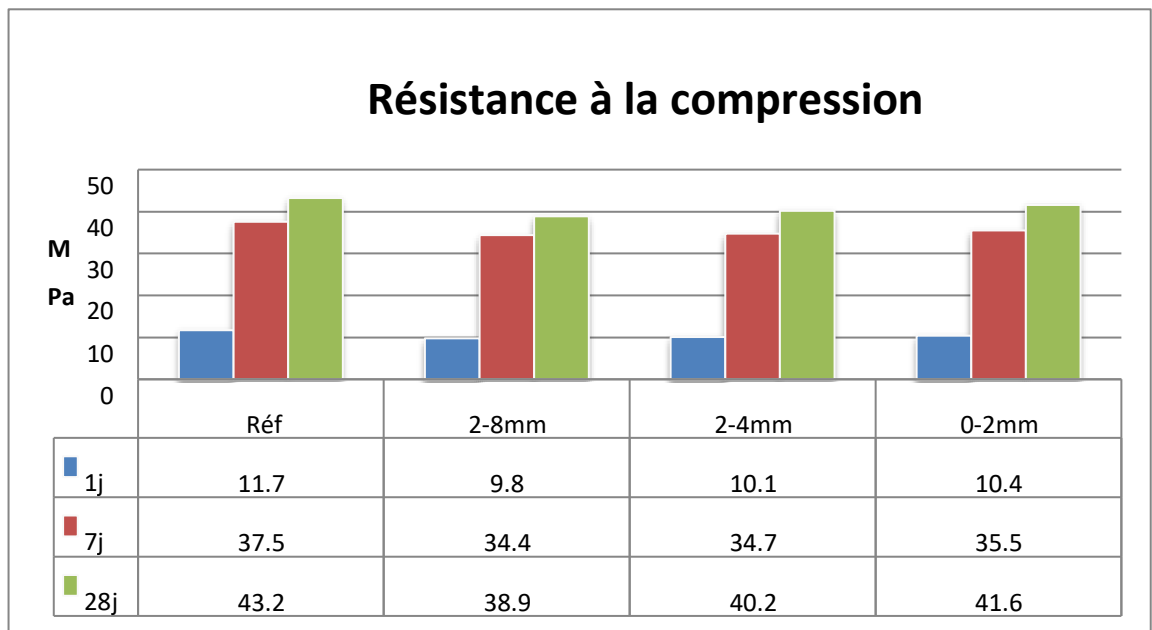


Figure 1.19 : La résistance à la compression pour différentes gradations de granulat léger.

[15]

Tableau 1.5: Influence de l'argile expansée sur la résistance à la compression du béton. [4]

Bloc	Type de granulat remplacé	Proportion d'argile expansée %	Taille d'argile expansée (mm)	Réduction (%)
1	Gravier	100	4-8	20
2	Fines + gravier	50 + 50	/	3.4
3	Fines + gravier	100 + 100	0-4, 4-8	48.73
4	Fines	33.33 et 50	0-2	6.26 et 12.4

Lorsqu'une partie de l'agrégat grossier à poids normal a été remplacée par de l'argile expansée à 28 jours, le premier mélange de béton a subi une réduction d'environ 20% de la résistance à la compression par rapport au mélange de référence. En 28 jours, la résistance à la compression du deuxième mélange de béton a été légèrement diminuée d'environ 3,4 % en raison de la substitution partielle des agrégats à poids normal par 50 % d'argile expansée (en volume). Le troisième mélange de béton a connu une réduction significative d'environ 48,73% de la résistance à la compression à 28 jours lorsque les agrégats à poids normal (taille de basalte 0–4, 4–8 et 8–16 mm) ont été partiellement remplacés par de l'argile expansée (taille 0–4 et 4–8 mm). Lorsque le sable à poids normal a été partiellement remplacé par de l'argile expansée préalablement humidifiée (taille 0-2 mm), le quatrième mélange de béton a subi des réductions de résistance à la compression de 12,4 % et 6,26 % (en volume) respectivement à 28 jours.

Il a été démontré que l'utilisation d'argile expansée réduit la résistance mécanique. Au fur et à mesure que la teneur en argile expansée augmente, la résistance mécanique diminue. Comme dans le cas du bloc 1, l'utilisation d'argile expansée en tant qu'agrégat grossier peut réduire la résistance à la compression d'environ 20 %. La résistance à la compression diminue davantage lorsque l'argile expansée est introduite en tant qu'agrégat fin et grossier. La baisse de la résistance à la compression peut s'étendre de 3,4 % à 48,73 %. Cela dépend principalement de plusieurs facteurs, notamment l'âge du béton, la quantité de ciment, les caractéristiques de l'agrégat à poids normal, le rapport eau/liant, la résistance à l'écrasement de l'argile expansée, les caractéristiques de l'argile expansée et la taille. Le béton en argile expansée a une résistance mécanique inférieure. Comme indiqué précédemment, l'argile expansée réduit la densité du béton. Par conséquent, la résistance mécanique diminue, et il a été démontré que la résistance à la compression augmente avec la densité du béton. Par contre, l'argile expansée présente une résistance à l'écrasement inférieur à celle de béton témoin, cela est dû aux particules et les vides ouverts qui sont plus faibles par rapport aux agrégats naturels. Étant donné que l'argile expansée est un matériau poreux, la fracture se produit généralement au niveau des agrégats. [4]

Selon Bensalem et al. [32] les résultats de l'utilisation des différentes fractions des granulats d'argile expansée dans le béton sont exprimés dans le tableau I.6, révèlent qu'en incorporant des granulats d'argile expansée, la résistance à la compression diminue après 28 jours. Plus précisément, les bétons contenant des granulats d'argile de taille (8/16) et

(16/25) montrent une diminution plus importante par rapport à ceux contenant du sable d'argile (0/4). Toutefois, malgré cette diminution globale de la résistance à la compression, les bétons avec 30% de granulats d'argile expansée (0/4) mm présentent une réduction mineure de seulement 9% par rapport aux autres mélanges. Par conséquent, il est recommandé d'utiliser des granulats d'argile expansée de taille 0/4 mm avec un taux de substitution de 30% pour atteindre un équilibre optimal entre réduction de poids et résistance à la compression.

Tableau 1.6: Propriétés du béton des mélanges sans et avec granulats d'argile expansée.

[32]

Béton	Granulats légers (%)	E/C	C (Kg/m³)	Porosité (%)	Résistance à la compression
B1	0	0.6	350	3.2	32
B2	15% (8/16)	0.6	350	3.9	19
B3	30% (8/16)	0.6	350	4.6	18
B4	15% (16/25)	0.6	350	4	24
B5	30% (16/25)	0.6	350	5.3	19
B7	15% (0/4)	0.6	350	2.8	27
B8	30% (0/4)	0.6	350	2.9	29

L'augmentation du dosage en ciment dans les blocs en argile expansée entraîne une augmentation de la résistance à la compression. Cela est illustré dans le tableau I.7 [33], où l'on peut observer que la résistance à la compression augmente progressivement avec

l'augmentation du dosage en ciment. Par conséquent, il existe une bonne corrélation entre le dosage en ciment et la résistance à la compression des blocs. Une augmentation du dosage en ciment renforce la cohésion et la solidité du matériau, ce qui se traduit par une amélioration de sa résistance à la compression.

Tableau 1.7: Résistances à la compression des mélanges de béton. [33]

Bloc	Fraction d'argile expansée (mm)	Dosage en ciment Kg/m³	Résistance à la compression (MPa)
1	2/4, 4/8, 8/20	250	11.5
2	2/4, 4/8, 8/20	300	13
3	2/4, 4/8, 8/20	350	18.6

2- Résistance à la traction :

Les propriétés structurales du béton armé, telles que l'ancrage, l'adhérence, le cisaillement et la fissuration, sont influencées par la résistance à la traction du béton. La résistance à la traction est généralement déterminée à l'aide d'essais de fendage et d'essais de flexion. Il a été observé que l'influence de la méthode de conservation sur la résistance à la traction est plus marquée dans le cas du béton léger que dans celui du béton normal, contrairement à la résistance à la compression.

Pour comprendre le comportement du béton en traction, une méthode d'essai de résistance à la traction par fendage (méthode indirecte) est utilisée sur des échantillons cylindriques soumis à une charge ultime. Une tendance à la baisse a été observée par différents chercheurs sur la résistance à la traction par fendage dans le béton avec des granulats légers plutôt que des granulats normaux. [14]

Tableau 1.8: Résistance à la traction pour différents mélanges. [34]

Teneur en argile expansée (%)	Résistance en traction à 7 jours (MPa)	Résistance en traction à 28 jours (MPa)
5	2.07	3.28
10	2.16	3.95
15	2.37	4.24
20	2.20	3.69
25	1.97	3.3

Selon les recherches Viveket al. [34] la résistance en traction à 7 jours et à 28 jours varie en fonction de la teneur en argile expansée. Une augmentation de la teneur en argile expansée n'entraîne pas nécessairement une augmentation de la résistance en traction. Par exemple, la résistance en traction à 7 jours est maximale pour une teneur de 15% d'argile expansée, mais diminue légèrement à 20%. De même, la résistance en traction à 28 jours est maximale pour une teneur de 15% d'argile expansée, mais diminue à 20% et 25%. Les résultats sont présentés dans le tableau 1.8.

Ces résultats peuvent s'expliquer par plusieurs facteurs. L'argile expansée peut modifier les propriétés mécaniques du béton en affectant l'interlock entre les particules et en influençant la distribution des charges à l'intérieur de la matrice du béton. Une teneur plus élevée en argile expansée peut entraîner une dispersion plus importante des charges, ce qui peut affaiblir les liens entre les particules et réduire la résistance en traction. La sélection avec soin la teneur en argile expansée lors de la conception de mélanges de béton afin d'obtenir les propriétés mécaniques souhaitées.

D'après Darayani [35] la résistance à la traction par fendage du béton autoplaçant contenant un agrégat léger artificiel fabriqué à partir de polystyrène expansé. L'étude a révélé que plus il y avait de variation dans la composition de l'agrégat léger artificiel, plus la résistance à la traction par fendage était faible. L'ajout de l'agrégat léger artificiel en substitution de l'agrégat grossier dans un mélange de béton normal et béton autoplaçant était le plus efficace avec un taux de substitution de 15 %, donnant une résistance à la traction par fendage de 2,23 MPa pour le béton normal et de 2,32 MPa pour le béton autoplaçant.

3- La résistance à la flexion :

Les bétons légers peuvent être utilisés comme membres porteurs de charge structurale. Le comportement en flexion des poutres en béton léger a été similaire à celle des poutres en béton normal. [36]

Selon les recherches des différents auteurs [14], Ils mettent en évidence plusieurs résultats clés sur la résistance en flexion des bétons légers à base des différents types des granulats légers utilisés. Tout d'abord, l'ajout de particules de granulats légers dans le béton entraîne une réduction de la résistance en flexion. Cette diminution est attribuée à la faible adhérence entre les particules des granulats légers et la pâte de ciment dans la matrice du béton. En revanche, lorsque le sable naturel est remplacé par un agrégat d'autre type de granulat léger, une augmentation de la résistance en flexion est notée. Cette amélioration de la résistance est attribuée à la réduction des pores et des vides dans le béton. Cependant, dans le cas du béton léger autoplaçant, une tendance de baisse de la résistance en flexion en raison de la présence d'eau libre et d'une adhérence interfaciale plus faible après un remplacement de 15 % du sable. Ces résultats soulignent l'influence significative de la composition des matériaux sur la résistance en flexion du béton léger et mettent en évidence l'importance de la sélection et du dosage appropriés des constituants pour obtenir les propriétés mécaniques souhaitées.

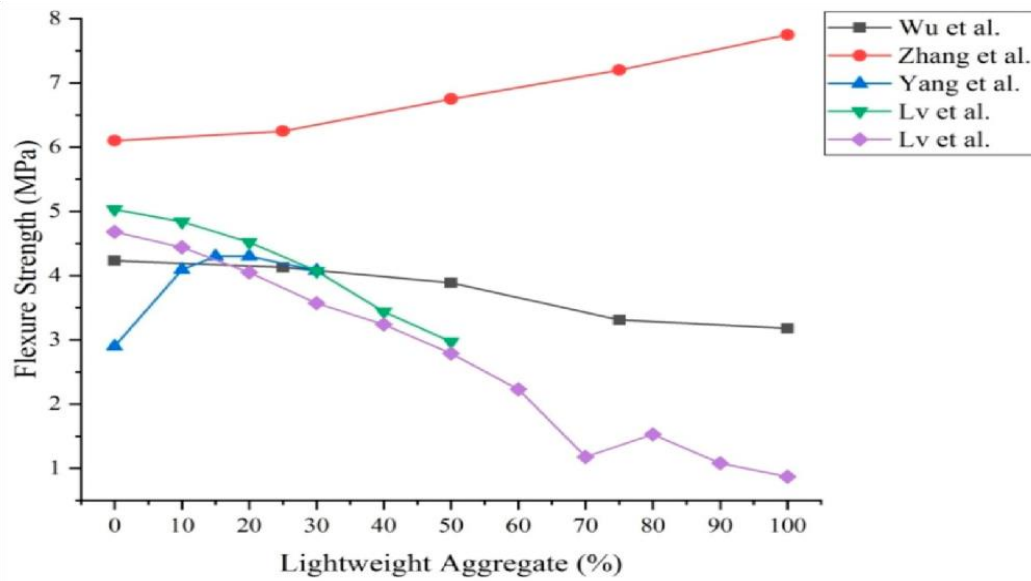


Figure 1.20 : Résistance à la flexion du béton léger. [14]

1.3.4.c. Propriétés élastiques :

Le module de Young d'un béton léger est significativement inférieur à celui du béton traditionnel en raison de sa faible densité. Les granulats légers ont généralement un module de Young inférieur à celui des granulats rigides. Le module de Young des bétons légers équivaut environ aux $\frac{3}{4}$ du module de Young du béton ordinaire ayant la même résistance. Cette relation permet de prendre en compte la différence de densité tout en préservant une résistance mécanique similaire. [3]

D'après Murat et al. [37], il est évident qu'il existe une bonne corrélation entre la résistance à la compression et le module de Young des bétons. La résistance à la compression augmente, le module d'élasticité a également une tendance à augmenter. De plus, le type d'agrégat joue un rôle crucial dans la détermination du module d'élasticité des bétons, comme le démontre dans Fig43. Ils ont noté que l'utilisation de deux types différents d'agrégats en argile expansée, chacun avec des propriétés physiques distinctes, a donné des résultats différents en termes de module d'élasticité. Ces résultats mettent en évidence l'importance de prendre en compte à la fois la résistance à la compression et le type d'agrégat.

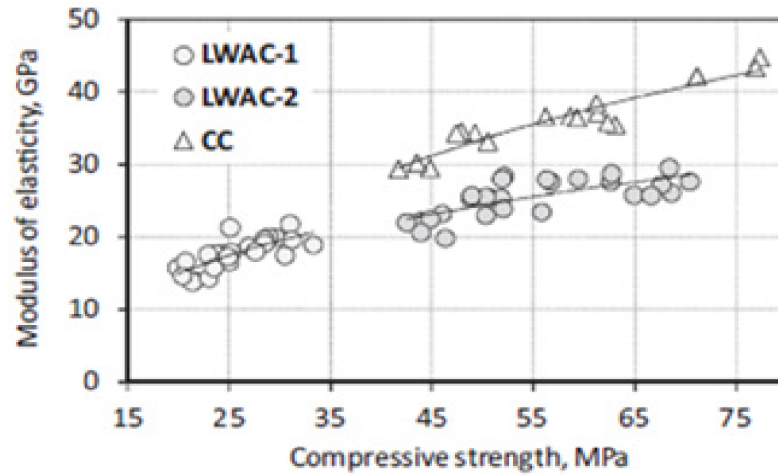


Figure 1.21 : Relation entre la résistance à la compression et le module d'élasticité pour les bétons de granulats d'argile expansée et le béton conventionnel. [37]

1.3.4.d. Retrait :

C'est un phénomène de raccourcissement qui accompagne la prise du ciment, on peut l'assimiler à l'effet d'un abaissement de température entraînant un accourcissement.

Le béton léger offre une plus grande perméabilité à l'humidité par rapport au béton de densité normale, ce qui entraîne un retrait de séchage plus élevé. En effet, le retrait de séchage du béton léger est généralement environ 5 à 40% plus élevé que celui du béton ordinaire. Il convient de noter que certains granulats peuvent présenter un retrait encore plus significatif. [38].

L'hydratation interne et la plus faible rigidité des granulats légers sont responsables du retrait initial plus faible et du retrait à long terme plus élevé du béton léger. Selon le type de granulats légers, le retrait d'un an du béton léger était d'environ 30 à 65% supérieur à celui du béton ordinaire. [39]

La pré-saturation des granulats légers en argile expansée réduit le retrait précoce et retarde le retrait dû au séchage. Cependant, la condition initiale de mouillage des granulats légers a peu d'influence sur le retrait à long terme. Le retrait peut être fortement affecté par la géométrie des éprouvettes, un phénomène plus pertinent dans le cas du béton léger que dans celui du béton ordinaire. Cela conduit à une plus grande susceptibilité du béton léger au retrait différentiel. [39]

1.3.4.e. Propriétés thermiques :

1. Coefficient de dilatation thermique :

Le tableau I.9 montre que le coefficient de dilatation thermique du béton d'agrégats légers est généralement inférieur à celui du béton de poids normal. Mais d'un autre côté, les éléments en béton d'agrégats légers ont une tendance plus faible à se déformer ou à se plier en raison des gradients de température différentiels. [28]

Une étude d'après Uygunoglu et al. [40] qui examine l'effet de type de granulats sur la dilatation thermique linéaire du béton à des températures élevées. Elle a révélé que les granulats légers et poreux présentaient un coefficient de dilatation thermique inférieur à celui des granulats normaux au-dessus de 100°C. De plus, les valeurs du coefficient de dilatation thermique du béton diminuaient avec une augmentation de la structure poreuse du granulats.

Tableau 1.9: Coefficient de dilatation thermique des bétons confectionnés avec des granulats légers. [28]

Type de granulats utilisé	Coefficient de dilatation thermique déterminé dans un intervalle de 22-52°C
Pierre ponce	10⁻⁶/°C
Perlite	9,4-10,8
Vermiculite	7.6-11
Cendres	8.3-14,2
Schiste expansée	Environ 3,8
Laitier expansée	6,5-8,1
	7-11,2

2. Conductivité thermique :

Les bétons de granulats légers présentent une propriété intéressante qui est leur capacité d'isolation thermique, grâce aux nombreuses bulles d'air présentes à travers l'épaisseur du matériau. Cette capacité d'isolation est mesurée par le coefficient de conductivité thermique, qui représente la quantité de chaleur qui traverse un matériau d'une épaisseur de 1 cm, par unité de temps, pour une différence de température de 1°C entre les deux faces. [38]

Pour les bétons armés courants de masse volumique sèche égale 2 400 kg/m³ on a un λ moyen de 1.80 en W/m.K. Pour les bétons à base d'argile expansée, on a les valeurs suivantes mentionnées dans le tableau I.10.

Tableau 1.10: Conductivité thermique en fonction de la masse volumique après séchage à l'étuve pour les bétons à base d'argile expansée. [31]

La masse volumique sèche du béton léger (kg/m³)	Conductivité thermique λ (W/m.K)
1000	0.30
1250	0.50
1500	0.70
1700	1

Selon Real et al. [41] la conductivité thermique du béton à granulats légers (BGL) est influencée par différents facteurs. Il a été observé que la conductivité thermique tendait à diminuer avec une augmentation du volume et de la porosité des granulats légers (GL), ainsi qu'une diminution de la densité, du rapport sable/liant, rapport eau/liant ou de la teneur en eau du béton. Il a constaté qu'il y avait, en moyenne, une réduction de 0,6% de la

conductivité thermique pour chaque augmentation de 1% de la porosité des granulats légers, ce qui indique qu'une porosité plus élevée des granulats légers contribue à une conductivité thermique plus faible. De plus, une réduction moyenne de la conductivité thermique a été observée avec chaque augmentation du volume des granulats légers grossiers. Le type de liant utilisé joue également un rôle dans la conductivité thermique du BGL, principalement en raison des variations de la densité du béton et du rapport volume de sable/liant.

Real et al. [41] suggèrent que les granulats légers présentant une porosité plus élevée conviennent davantage aux applications non structurales ou à la production de béton de faible résistance, car ils contribuent à une réduction de la densité et de la conductivité thermique, qui sont des facteurs importants dans la conception des bâtiments.

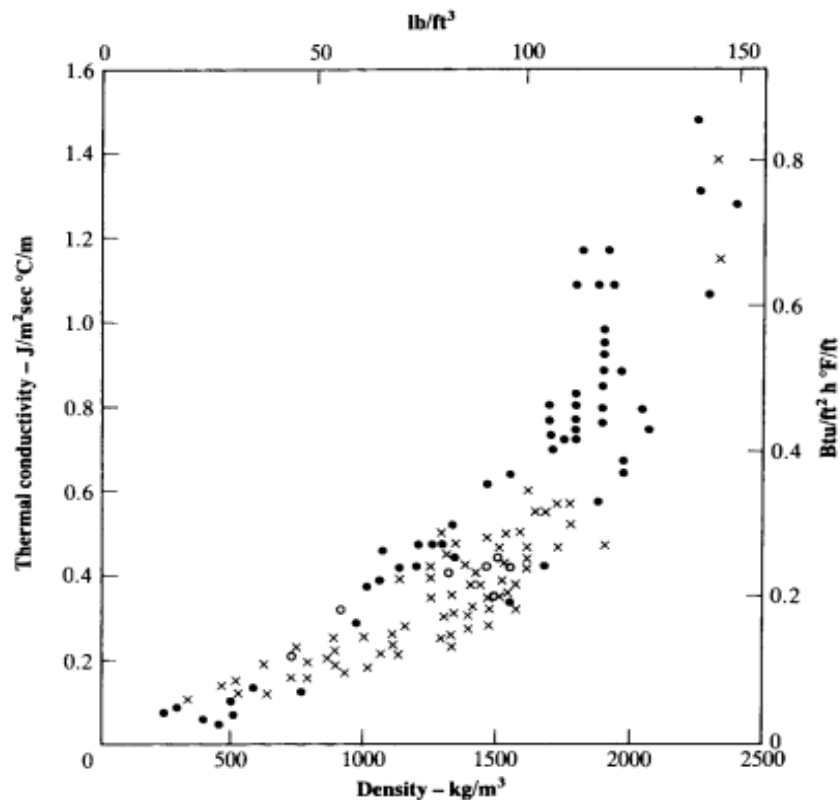


Figure 1.22 : Conductivité thermique des bétons à base des différents types des granulats légers. [28]

3. Résistance au feu :

Au cours de la durée de vie d'une structure en béton, l'une des conditions les plus adverses liées à l'environnement est l'incendie, qui entraîne une perte de rigidité et de capacité

portante, principalement due à la détérioration des propriétés mécaniques du béton et des barres d'acier soumises à des températures élevées. C'est pourquoi la résistance au feu est une propriété très importante pour le béton à granulats légers et pour le domaine de construction en général. [14]

La résistance au feu est plus grande pour les bétons à base d'agrégats légers par rapport aux bétons conventionnels car les agrégats légers ont une tendance moindre à l'éclatement ; ce béton subit également une perte de résistance moindre avec une augmentation de la température. [28] Cette capacité favorable s'explique également par le fait que les granulats légers ont tendance à moins se dilater lorsqu'ils sont exposés à des températures élevées, ce qui réduit les perturbations internes et diminue la perte de résistance du béton. [2]

1.3.4.f. Propriétés acoustiques :

Les performances d'absorption acoustique du béton léger sont excellentes en raison de la conversion de l'énergie sonore qui se propageant dans l'air en chaleur dans les minuscules interstices de l'agrégat. En comparaison avec le béton ordinaire, le béton léger présente un coefficient d'absorption acoustique environ deux fois plus élevé. [38]

Selon Sousa et al. [42], l'unité de maçonnerie en béton léger fabriquée avec de l'argile expansée présente d'excellentes propriétés d'isolation acoustique. Ils ont montré que l'utilisation d'un seul bloc en béton léger, plutôt qu'un mur double traditionnel en briques céramiques, permet d'obtenir une isolation acoustique optimisée entre les logements.

1.3.5. Aspects économiques de l'utilisation de béton à base des granulats légers :

La rentabilité économique du béton d'agrégats légers ne doit pas être jugée uniquement sur la base de son coût de production par rapport au béton normal. Bien que le processus de fabrication et la teneur en ciment plus élevée contribuent à son coût supérieur, il existe divers avantages financiers qui compensent cela. Cela comprend la réduction des charges permanentes, la facilitation du transport et de la manipulation, en particulier pour les éléments préfabriqués, et l'utilisation de sous-produits industriels comme agrégats. Les subventions et les taxes sur l'extraction des agrégats primaires jouent également un rôle dans la compétitivité du béton d'agrégats légers. De plus, la réduction de la quantité de matériaux entraîne des économies sur les coûts de construction, tels que les matériaux de coffrage, les étalements, les fouilles et la précontrainte. [2]

1.3.6. Domaines d'utilisation des bétons légers :

Depuis plusieurs décennies, l'utilisation de béton léger a été une pratique courante dans les activités de construction. De nos jours, grâce à la création de nouveaux types d'agrégats légers, le béton léger peut être employé dans un large éventail d'applications et domaines :

- Cloisons de séparation, matériau d'isolation, revêtements de sol et plafonds : Le béton léger peut être utilisé dans ces applications pour fournir une isolation thermique et réduire le poids global des structures.
- Structures de soutènement des terres : Le béton léger convient à la construction de structures de soutènement des terres, où les propriétés légères aident à réduire la charge sur la fondation.
- Matériau de remplissage en béton de faible résistance : Le béton léger peut également être utilisé comme matériau de remplissage dans des zones où une faible résistance est requise, comme les remblayages et les remplissages.
- Revêtement de tablier de pont : Le béton léger à base des granulats légers peut être utilisé dans la construction de revêtements de tablier de pont, offrant une solution durable et légère.
- Linteaux et construction de cottages : Le béton à base des granulats légers peut être utilisé dans la production de linteaux pour les fenêtres et la construction de cottages, offrant un soutien structurel tout en réduisant le poids global de la structure.
- Revêtements de chaussée, trottoirs et bordures : Le béton léger peut être utilisé pour les revêtements de chaussée, les trottoirs, les barrières de sécurité et les bordures, offrant une solution durable et rentable.
- Systèmes de drainage en béton : Le béton léger à base des granulats légers peut être utilisé dans la construction de canalisations en béton, offrant une solution de drainage légère et efficace. [14]

1.4. L'hourdis :

1.4.1. Définition :

Le corps creux de remplissage en béton, également connu sous le nom d'entrevous, est placé entre les poutrelles d'un plancher. En règle générale, les hourdis en béton remplissent

le rôle de coffrage pour une dalle de compression qui reste solidaire aux poutrelles. Cependant, dans certains cas, ils intègrent la dalle de compression et ses porteurs. Il est aussi sous forme des moules préfabriqués de différentes épaisseurs sans armature qui s'installent entre les poutrelles béton comme il est corps creux du plancher. [43]

1.4.2. Formulation des pièces du hourdis :

Blocs d'hourdis traditionnels ou à base des granulats légers sont généralement produites en mélangeant du ciment, granulats naturels ou légers comme l'argile expansée et de l'eau de gâchage, on introduit la formulation dans le système de la presse puis le processus de fabrication soit automatique. Les granulats passent dans une trémie pour déterminer les quantités nécessaires pour chaque faction puis transférés vers le malaxeur et rajouter le ciment où l'eau est versée.

Le mélange est soigneusement malaxé jusqu'à ce qu'il devienne homogène, ce mélange obtenu présente un béton ferme. Ensuite le béton est automatiquement transporté par un tapis roulant vers la trémie de la presse vibrante (ROMETA), le remplissage des moules est effectué par une cuve de remplissage pendant la vibration et ensuite le mélange est compressé et démouler en même temps. Les blocs ainsi former sont transférés sur une table dans une zone de stockage pour le processus de durcissement.

Cette zone de maturation est généralement une chambre isolée, la chambre est utilisée pour la cure des blocs d'hourdis, la température dégager par la chaleur d'hydratation du ciment joue un rôle dans la diminution du temps de durcissement et l'eau dégager est utiliser pour la cure des blocs, cette méthode évite une grande perte de temps que la méthode d'arrosage, ce qui permet d'optimiser la productivité de l'usine.

Les blocs sont ensuite emballés et stockés dans une aire de stockage si nécessaire, Ces blocs sont utilisés dans le remplissage non porteurs et de planchers dans le but de réduire la charge permanente dans les immeubles à plusieurs étages.



Figure 1.23 : Hourdis à base d'argile expansée.

Tableau 1.11: Dimensions d'un bloc du hourdis.

Dimensions (mm)	200X150X520
Volume (m³)	0.00533

1.4.3. Avantages de l'hourdis à base d'argile expansée :

- Allégement de la construction ;
- Rapidité de la mise en œuvre ;
- Bonne isolation thermique et Acoustique ;
- Absence de fissuration ;
- Economie de béton et armatures. [43].

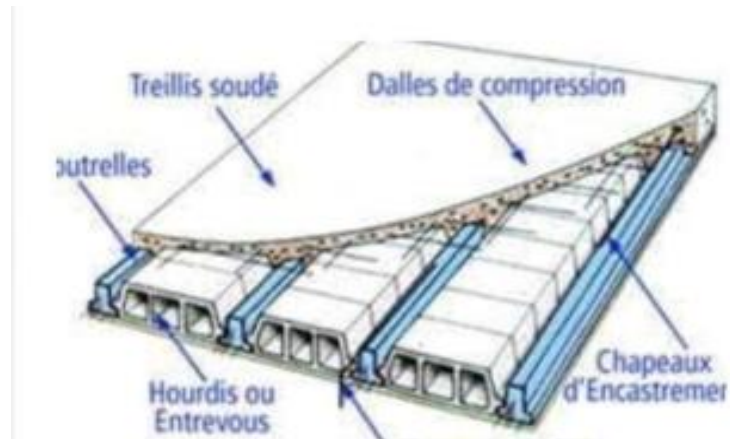


Figure 1.24 : Le rôle de l'hourdis sur le plancher (dalle de compression). [43]

1.5. Conclusion :

Selon les recherches présentées dans ce chapitre on déduit que les bétons légers présentent une masse volumique plus faible que les bétons traditionnels, cette propriété unique des bétons légers est dû à la caractéristique principale des granulats légers qui est la légèreté,

La masse volumique des bétons légers varie de 400 à 1800 kg/m³ cette variation à une influence directe sur la résistance du béton.

Les différentes recherches ont montré qu'il y a plusieurs types de granulat légers (artificiel et naturel), ces granulats légers présentent une faible masse volumique mais aussi une forte absorption d'eau.

D'après nos recherche la grande Adhérence entre les granulats légers et la pâte cimentaire jouent un rôle très important dans la résistance des bétons légers, néanmoins les bétons légers exigent un fort dosage en ciment pour de meilleur résultat. Les bétons légers présentent une meilleure isolation thermique et acoustique par rapport à des bétons traditionnels, et permet d'avoir une meilleure résistance au feu.

CHAPITRE 2 : MATERIAUX ET ESSAIS

2.1. Introduction du chapitre :

Ce chapitre a pour objectif de présenter les principales caractéristiques des matériaux utilisés dans la formulation de l'hourdis léger et traditionnel, ainsi que la procédure expérimentale employée. En outre, il sera détaillé les méthodes d'essais qui ont été réalisées.

2.2. Caractéristiques des matériaux :

2.2.1. Le ciment :

Pour la réalisation de cette étude, le ciment utilisé est un ciment portland composé CEM II /A-L 52.5N. ce ciment vient de Lafarge Algérie, mieux connu sous le nom de SARIE.



Figure 2.1: Ciment SARIE 52.5N

- Analyse chimique du ciment :

Tableau 2.1: Composition chimique du ciment. [44]

Composition chimique (%)									
Cao	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	PAF	Cl
63.81	18.64	5.03	3.04	1.53	2.91	0.17	0.63	3.39	0.036

- Propriétés physiques :

Tableau 2.2: Propriétés physiques du ciment.

Essai	Masse volumique (kg/m³)	Refus par tamisage %	SSB (cm²/g)	Consistance %	Expansion (mm)
La norme	NF P15-435 [45]	NA 231 [46]	NA 231 [46]	NA 230 [47]	NA 232 [48]
Résultat	3210	5	4084	28.4	2

- Temps de prise NA 230 [47] :

Tableau 2.3: Début et fin de prise du ciment.

Début de prise (min)	Fin de prise (min)
170	225

- Chaleur d'hydratation EN 196-1 [49] :

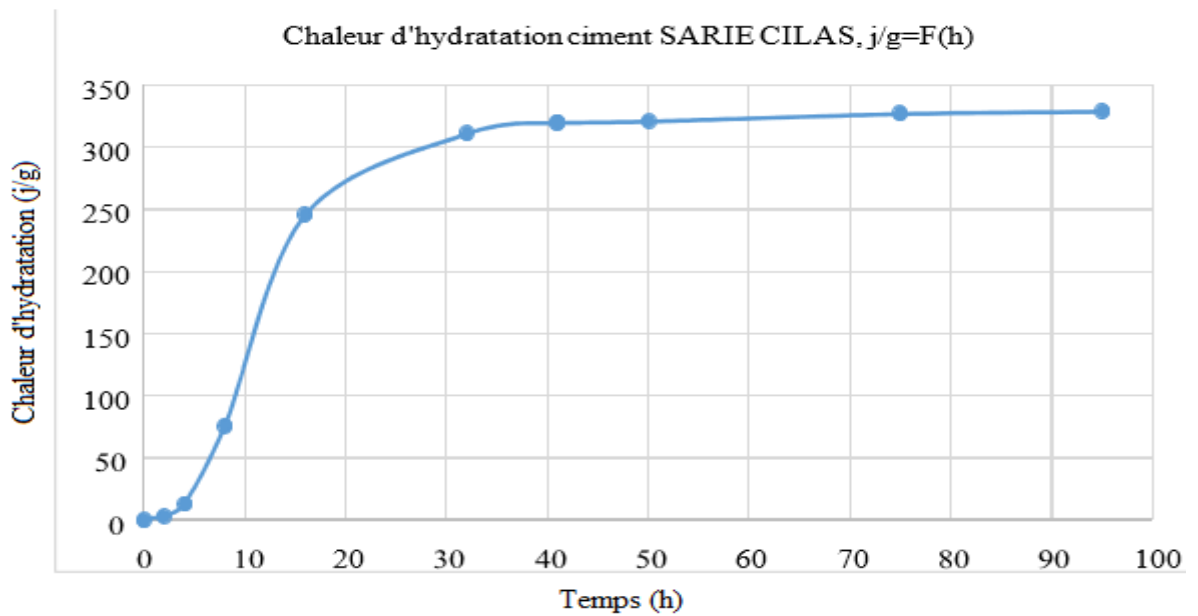


Figure 2.2: Courbe de la chaleur d'hydratation du ciment SARIE.

- Résistance à la compression et à la flexion du ciment NA 234 [50]:

Tableau 2.4: Résistance à la compression et à la flexion du ciment.

Type de ciment	Résistance de 2jrs		Résistance à 7jrs		Résistance à 28jrs	
	Compression (MPa)	Flexion (MPa)	Compression (MPa)	Flexion (MPa)	Compression (MPa)	Flexion (MPa)
SARIE	34.41	6.14	48.62	7.41	56.79	8.13

2.2.3. Les granulats utilisés :

Dans cette étude on a utilisé 2 types de granulats, Granulats naturels et granulats légers.

1. Les sables :

a) les sables classiques :

- Sable 0/4 (grossier) provenance de la carrière de Kafazro.

b) les sables argile expansée :

- Sable 0/3 AC provenance de l'usine d'ALGEXPAN.

2. Les graviers :

a) gravier classique :

- Gravier 3/8 provenance de la carrière de Kafazro.

b) gravier d'argile expansée :

- Gravier 3/8 AC provenance de l'usine d'ALGEXPAN.

2.2.3.a. La masse volumique apparente NF EN 1936 [51] :

Tableau 2.5: La masse volumique des granulats et leur taux d'humidité.

Type de granulats	Masse volumique humide (kg/m ³)	% d'humidité	Masse volumique apparente (kg/m ³)
Sable 0/4	1574.88	0.4	1568.58
Sable AC0/3	747.26	2.04	732.02
Gravier 3/8	1399.79	0.6	1391.39
Gravier AC 3/8	550.94	1.01	545.38

2.2.3.b. : Masse volumique absolue des granulats [51] [52] :

Tableau 2.6: Masse volumique absolue et coefficient d'absorption des granulats.

Type de granulat	La norme	Masse volumique absolue (Kg/m ³)	Masse volumique réelle (Kg/m ³)	Masse volumique saturée a surface sèche (Kg/m ³)	Coefficient d'absorption d'eau (%)
Sable 0/4	NF EN 1936	2710	2670	2690	0.63
Sable 0/3AC	NF EN 1097-6 b	1572	1419	1516	6.88
Gravier 3/8	NF EN 1936	2750	2600	2650	2.05
Gravier 3/8AC	EN NF 1097-6 c	955	/	/	22.71

2.2.3.c. : Essais de la propreté des sables [53] [54] :

Tableau 2.7: Essai équivalent de sable et bleu de méthylène.

Essai	ES %	VB %
Norme	EN NF P18-598	NA 1948
Sable 0/4	60<60.56<70%	0.17
Sable AC 0/3	85.1>80%	0.17

Selon les résultats de tableau, Le sable naturel 0/4 présente un pourcentage de fines de 60% à 70% et une valeur de bleu de méthylène (VB %) de 0,17. En revanche, le sable AC 0/3 contient plus de 80,1% de fines, tout en ayant également une VB % de 0,17. Ces chiffres indiquent une plus grande proportion de fines dans le sable d'argile expansée concassée à faible pourcentage des fines argileuses convenant parfaitement pour des bétons de qualité.

2.2.3.d. : Analyse granulométrique NA 2607 [55] :

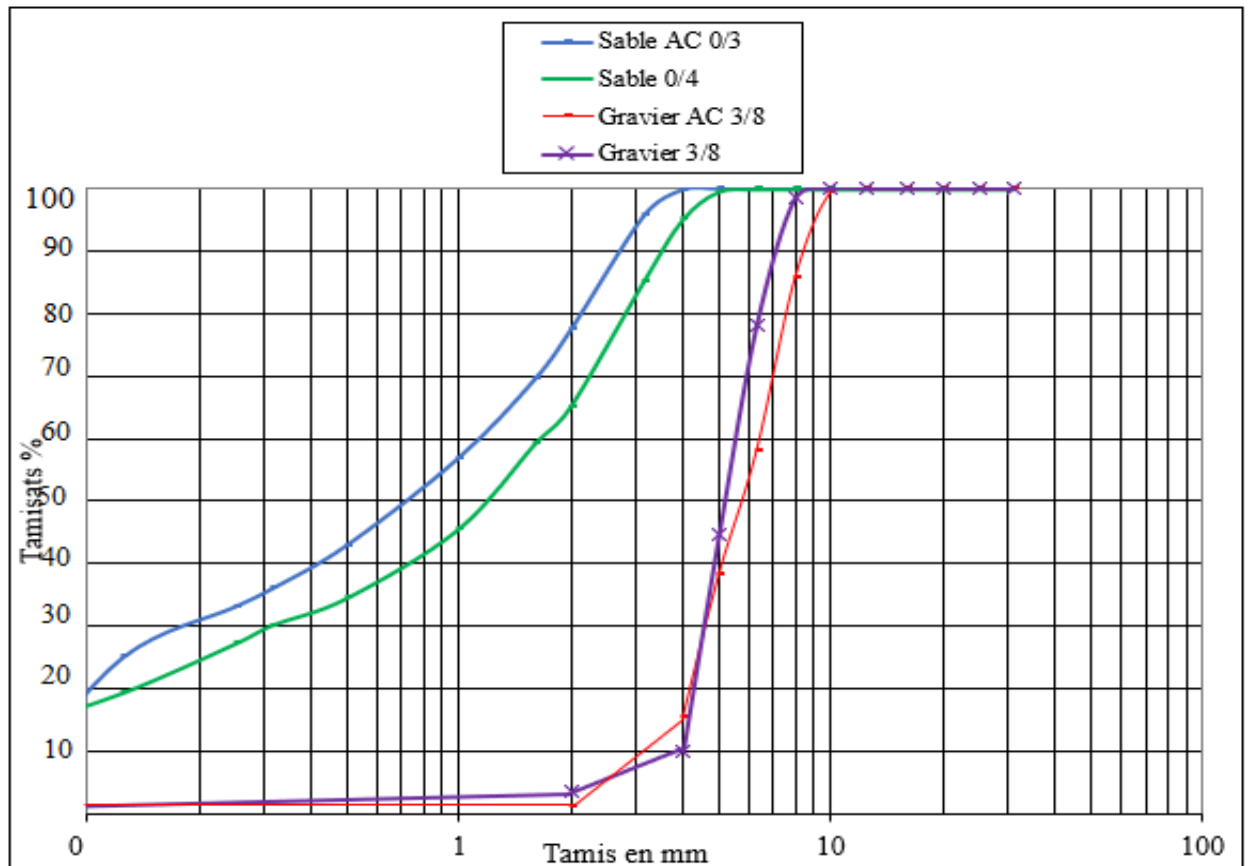


Figure 2.3: Courbes granulométriques pour les différents granulats utilisés.

- Module de finesse pour les sables utilisés :

Tableau 2.8: Module de finesse des sables.

Type de sable	Sable AC 0/3	Sable naturel 0/4
Module de finesse MF	2.65	3.11

2.2.3.e. : Coefficient d'aplatissement NA 5125 [56] :

Tableau 2.9: Coefficient d'aplatissement des graviers.

Type de gravier	Coefficient d'aplatissement A (%)
Gravier 3/8 mm	15.14 < 30
Gravier AC 3/8 mm	2.43 < 30

Ce tableau présente les coefficients d'aplatissement pour le gravier naturel 3/8 mm et gravier d'argile expansée AC 3/8 mm. Ces valeurs sont inférieures à 30. Le coefficient d'aplatissement mesure la forme des particules de gravier, et des valeurs inférieures à 30 indiquent une forme relativement bien arrondie.

2.2.3.f. Essai d'analyse chimique par XRF EN 1744 [57] :

Tableau 2.1: Analyse chimique d'argile expansée XRF

Échantillon	PAF %	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	CaO %	MgO %	SO ₃ %	K ₂ O %	NaO ₂ %	P ₂ O ₅ %	TiO ₂ %	Somme %
Argile avant cuisson	9.5	54.06	18.46	7.57	2.88	2.24	0.38	3.31	0.70	0.12	0.77	100
Argile expansée	0.41	59.73	20.51	8.23	3.04	2.50	0.38	3.48	0.72	0.14	0.86	100

2.3 Formulation des bétons :

Dans cette étude, 5 formulations d'hourdis et leurs éprouvettes équivalentes de même composition ont été réalisés :

- FT : Formulation traditionnelle, 40% sable naturel 0/4 et 60% gravier naturel 3/8.
- F100% : Formulation avec 100% du gravier d'argile expansée AC 3/8, 0% du sable AC 0/3 et 0% de granulats naturels.
- F90% : Formulation avec 10% du sable d'argile expansée AC 0/3 et 90% du gravier d'argile expansée AC 3/8 et 0% de granulats naturels.
- F75% : Formulation avec 25% du sable d'argile expansée AC 0/3 et 75% du gravier d'argile expansée AC 3/8 et 0% de granulats naturels.
- F60% : Formulation avec 40% du sable d'argile expansée AC 0/3 et 60% du gravier d'argile expansée AC 3/8 et 0% de granulats naturels.

La méthode de Dreux Gorisse a été utilisée pour déterminer la première formulation "FT," qui est une formulation traditionnelle composée de 40% de sable naturel 0/4 et de 60% de gravier naturel 3/8.

La méthode de Dreux-Gorisse est une méthode de formulation de béton qui permet de déterminer les quantités optimales de matériaux nécessaires à la confection d'un mètre cube de béton. Cette méthode permet de définir de façon simple et rapide une formule de composition à peu près adaptée au béton étudié mais que, seules quelques gâchées d'essais et la confection des éprouvettes permettront d'ajuster au mieux la composition à adopter définitivement en fonction des qualités souhaitées et des matériaux effectivement utilisés.

Les résultats obtenus ont révélé une composition "FT" de 60% de gravier et 40% de sable, ce qui a ensuite servi de base pour la formulation équivalente "F60%," composée de 60% de gravier d'argile expansée AC 3/8, 40% de sable AC 0/3 et aucun granulats naturels.

Les autres formulations, "F75%," "F90%," et "F100%," ont été adaptées en modifiant les proportions de sable d'argile expansée AC 0/3 dans la composition, tout en conservant une quantité significative de gravier d'argile expansée AC 3/8. En raison de la différence de masse volumique entre le sable AC 0/3, qui est plus dense, et le gravier AC 3/8.

Tableau 2.2: Composition des bétons étudiés.

Les dosages et quantités des matériaux	Les formulations				
	FT	F60%	F75%	F90%	F100%
Ciment (Kg/m³)	180	200	250	320	380
Eau (Kg/m³)	92	174	147.5	150.4	152
Le rapport E/C	0.46	0.87	0.59	0.47	0.4
Sable 0/4 mm (Kg)	1084	-	-	-	-
AC 0/3 mm (Kg)	-	629	393	157	-
Gravier 3/8 mm (Kg)	1650	-	-	-	-
AC 3/8 mm (Kg)	-	573	716.25	859.5	955

- Gâchée de l'essai NF P 18-404 [58] :

La norme NF P 18-404 distingue les essais d'étude, ces derniers sont réalisés au laboratoire, ils permettent de vérifier la qualité de l'essai, la maniabilité du béton et sa résistance.

Selon la norme, les composants sont introduits dans le malaxeur dans l'ordre suivant : gros granulats, liant, sable et eau de gâchage. Les composants sont malaxés à sec pendant une minute avant d'être ajoutés à l'eau, puis deux minutes après l'ajout de l'eau.

2.3.1. Confection et conservation des éprouvettes pour essais de résistance NA 5093 [59] :

Après la précédente étape on procède au remplissage des moules conforme à la norme NA 5074, [60]. Ces moules ont été préalablement nettoyés et lubrifiés à l'aide d'une huile qui facilitera le démoulage. On remplit les moules en deux couches. Les éprouvettes sont

lissées et conservés dans une salle à une température de 20 ± 2 °C pendant 24 heures, puis démoulé et placé dans des bacs d'eau à 20 °C.



Figure 2.4: Echantillons des différents bétons.

2.3.2. Essais sur béton a l'état frais :

- a) La masse volumique fraîche NA 436 [61] :

La première étape consiste à peser le moule vide et le remplir avec l'échantillon en le compactant conformément à la norme NA 426 et le peser après nettoyage.

2.3.3. Essais sur béton a l'état durci :

- a) Détermination des masses volumiques durcies, humide et sèche NA 435 [62] :

La masse d'échantillon à l'état durci après démoulage est enregistrée. L'échantillon est ensuite immergé dans un bain d'eau qui est maintenu à une température de 20 ± 2 °C avec la détermination de la masse dans cet état. Ensuite, l'échantillon est séché dans une étuve à une température de 105 ± 5 °C jusqu'à ce qu'à la masse est constante. Ainsi, la masse volumique de l'échantillon est calculée dans les trois états : durci, humide et sec.

- b) Résistance la compression NA 427 [63] :

Les plateaux de la presse sont nettoyés, l'échantillon est centré dans le plateau et la charge est appliquée de manière continue jusqu'à la rupture de l'éprouvette.



Figure 2.5: Dispositif de l'essai de compression des éprouvettes.

- Afin d'évaluer la résistance à la compression des hourdis, il est nécessaire de placer les surfaces latérales des pièces d'hourdis dans l'appareil de compression. Et lancer l'essai.



Figure 2.6: Dispositif de l'essai de compression des pièces du hourdis.

- c) La conductivité thermique NF EN 993-15 [64] :

La norme NF EN 993-15 décrit une méthode de détermination de la conductivité thermique des produits réfractaires façonnés denses en utilisant la technique du fil chaud

(parallèle). Cette méthode implique l'utilisation d'un fil chaud pour appliquer une source de chaleur à deux éprouvettes de béton, de manière à ce que la sonde de l'appareil CT-Mètre soit placée entre elles. La conductivité thermique est symbolisée par la lettre lambda λ et s'exprime en W/m.K.



Figure 2.7: Dispositif de l'essai de la conductivité thermique.

2.4. Récapitulatif du programme des essais :

Notre étude expérimentale était dédiée à la réalisation d'essais de caractérisation des matériaux utilisés, afin de pouvoir réaliser les différentes formulations des pièces du hourdis légers et traditionnels leurs éprouvettes équivalentes de même composition, et réaliser les essais à l'état frais et durci ; les organigrammes ci-après synthétise notre programme expérimental.

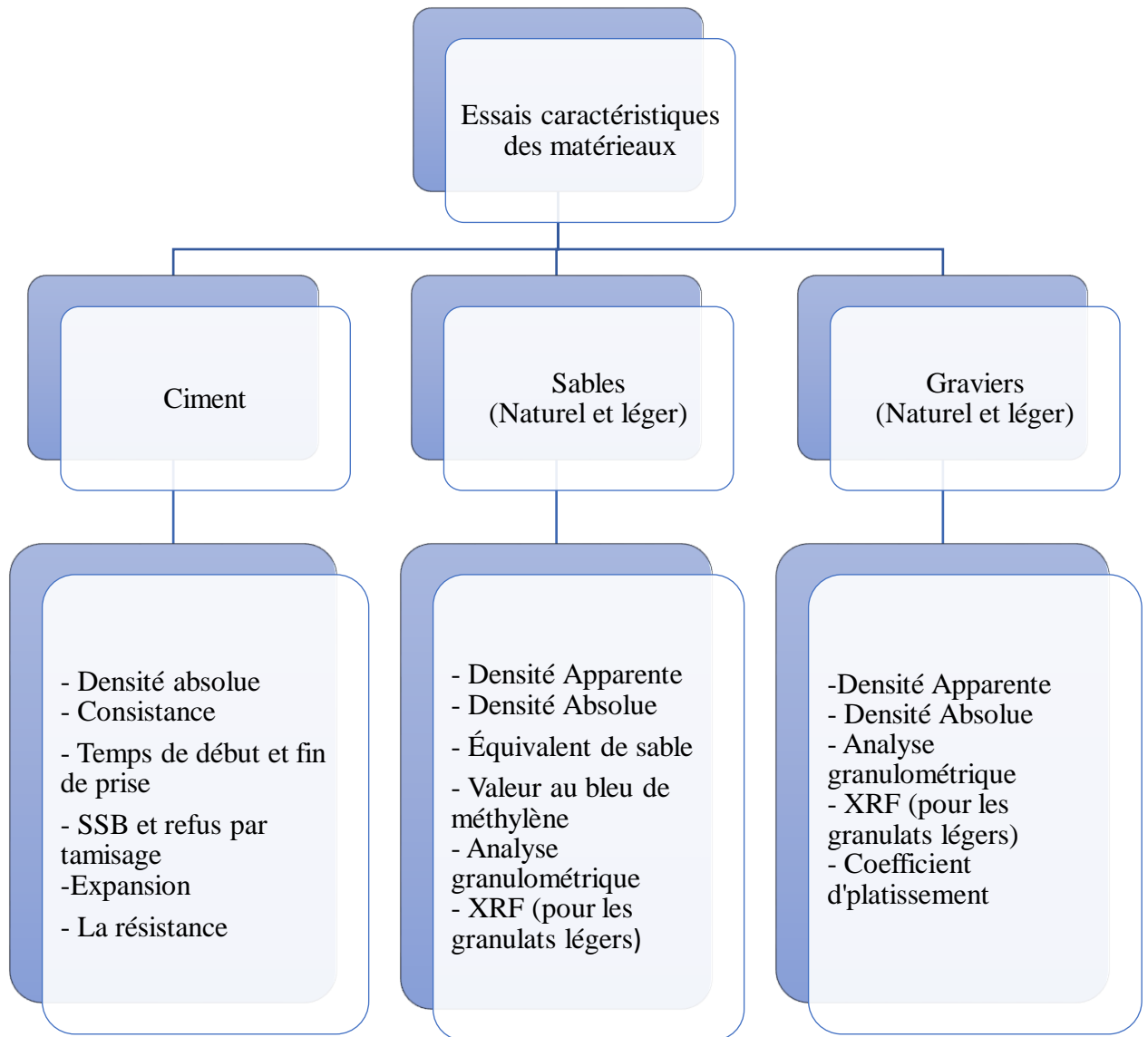


Figure 2.8: Organigramme récapitulatif des essais.

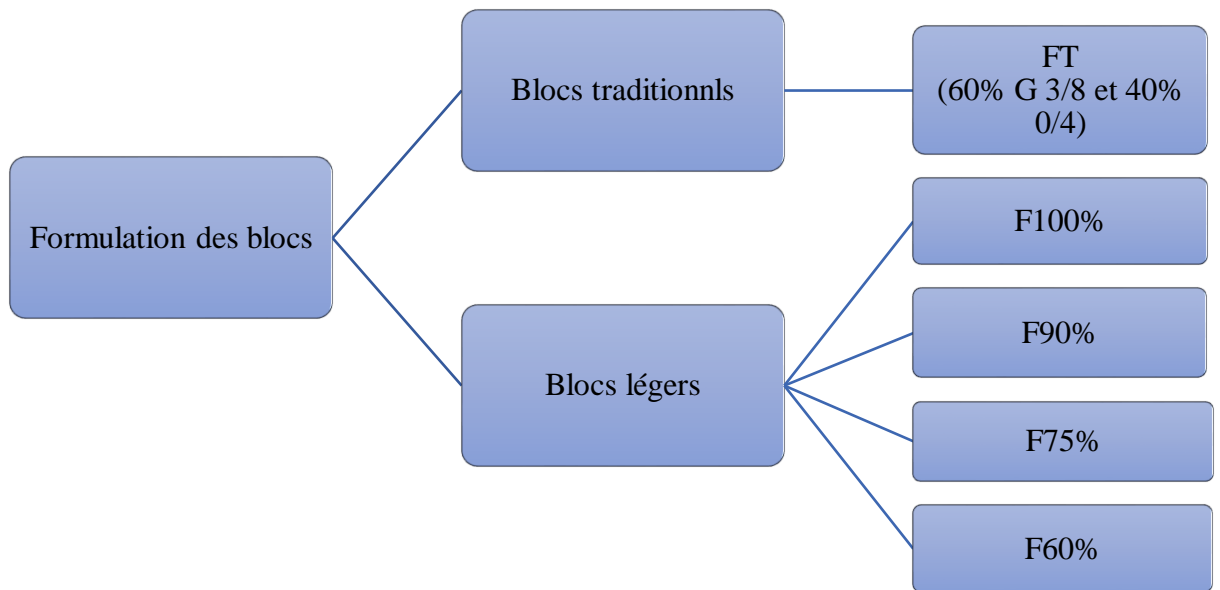


Figure 2.9: Organigramme des différentes formulations.

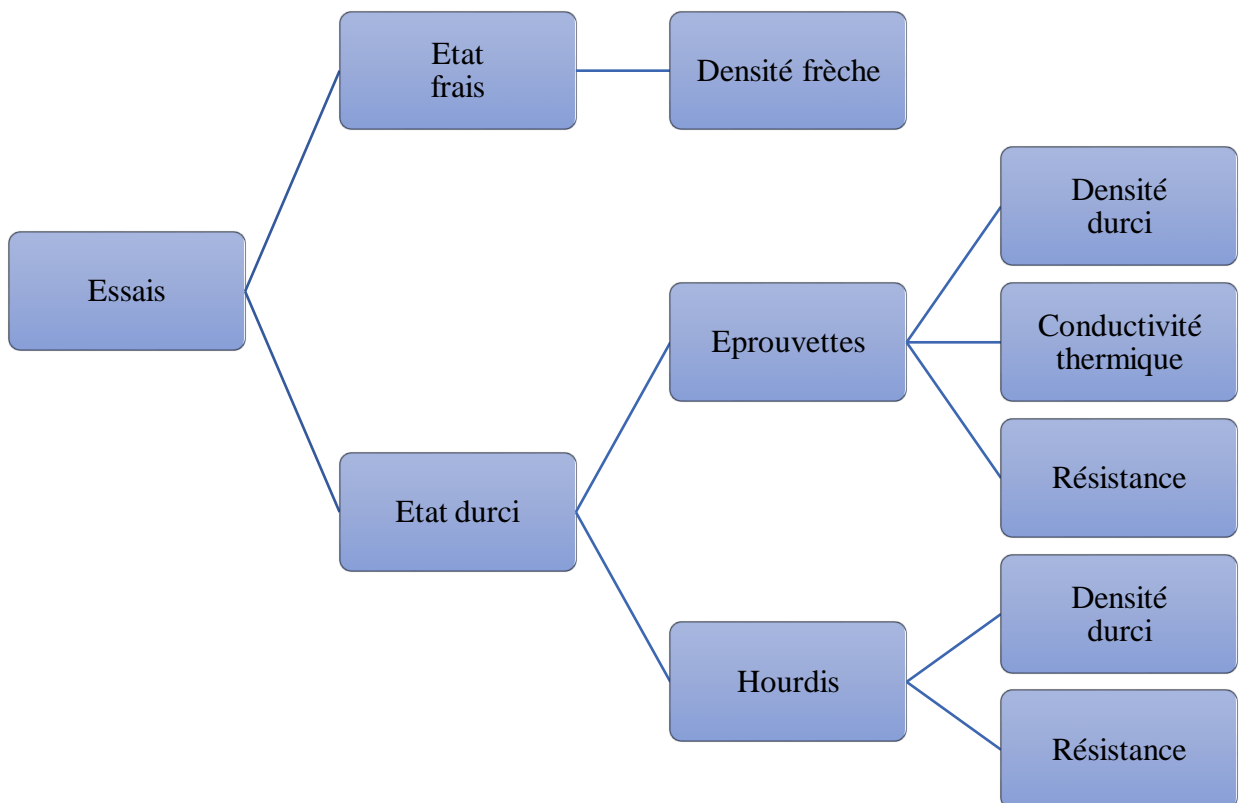


Figure 2.10: Organigramme des essais sur les bétons.

CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSIONS.

3.1. Introduction :

Dans ce chapitre on présente les résultats obtenus des essais physique et mécanique et de la conductivité thermique réaliser sur les différentes formules de béton (léger et traditionnel) avec une étude technique et économique sur les différentes pièces pour déterminer la meilleure formulation légère pour le marché algérien.

3.2. Essais à l'état frais :

3.2.1. La masse volumique fraîche :

La masse volumique est variable et admissible autour d'une valeur cible correspondant à une masse volumique normale, la masse volumique des bétons est directement liée à leur constituant. Les résultats de l'essai sont démontrés sur le tableau et la figure ci-dessous.

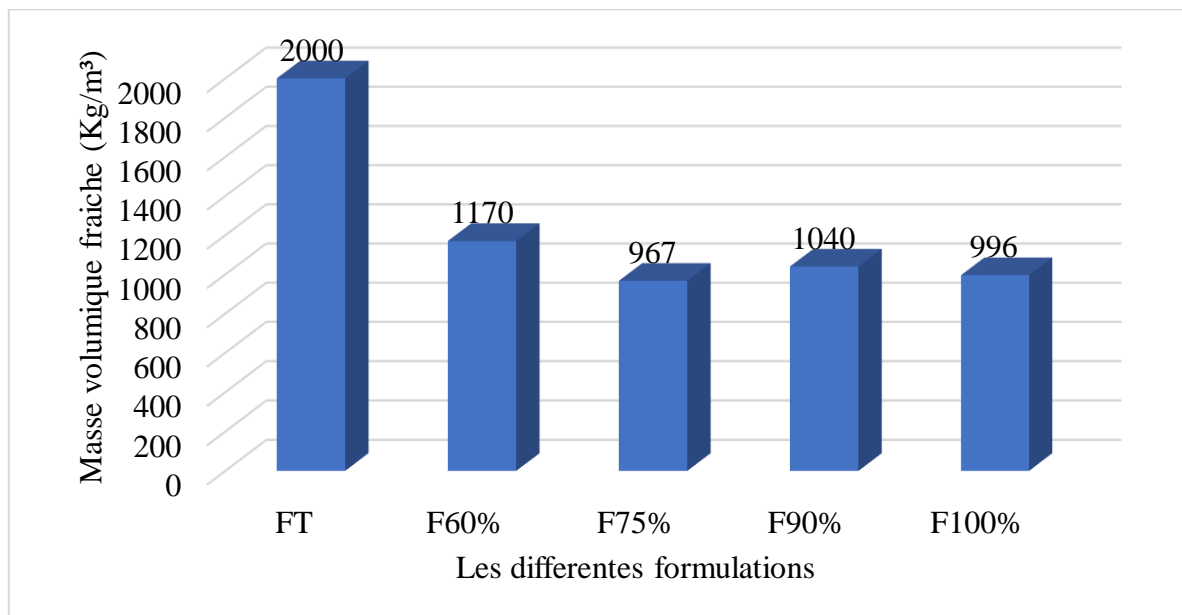
Le béton traditionnel formulé dans notre étude est constitué de granulats concassés naturels sa masse volumique fraîche est de 2000kg/m^3 .

Tandis que la masse volumique fraîche des bétons légers varie de 967kg/m^3 à 1170kg/m^3 et de l'est dû à la variation dans la quantité de sable et granulats d'argile utilisés dans les différentes formules.

La valeur de la Masse volumique fraîche diminue lors de l'utilisation d'agrégats d'argile expansée, et ce en raison de la légèreté de ces agrégats et de leur faible densité. La diminution de la densité est de 50.2% 48% 48.35% et 41.5% pour les formulations respectivement F100%, 90%, 75% et F60% par rapport la référence. Cette différence est très grande dans la formulation F60% qui contient 40% de sable d'argile expansée 0/3mm et 60% de gravier 3/8mm de même granulats légers.

Tableau 3.1: La masse volumique fraiche des différents types de béton.

Formule	Masse volumique fraiche (kg/m ³)	Réduction (%)
FT	2000	Référence
F60%(AC)	996	41.5
F75%(AC)	967	48.35
F90%(AC)	1040	48
F100%(AC)	996	50.2

**Figure 3.1:** Masse volumique fraiche.

3.3. Essais à l'état durci :

3.3.1. La masse volumique à l'état durci :

3.3.1.a. La masse volumique durcie des éprouvettes du béton :

La masse volumique des bétons est directement liée à la masse volumique de leurs constituants, les résultats de l'essai sont démontrés sur le tableau et la figure ci-dessous.

La masse volumique humide est plus grande par rapport la masse volumique durci et sèche car l'incorporation d'eau entre les vides du matériau et à l'intérieur des granulats, notamment des granulats d'argile expansée conduit à une densité plus élevée. La masse volumique sèche est toujours la plus faible pour les différents mélanges car l'eau existant est évaporée et éliminée complètement, ce qui réduit cette grandeur physique.

Tableau 3.2: Les différentes masses volumiques à l'état durci.

Formule	Masse volumique durci	Masse volumique humide	Masse volumique sèche
FT	1933	2050	1901.33
F60%(AC)	1151	1100.44	891.85
F75%(AC)	956.6	1096.59	932.74
F90%(AC)	1023	1082.96	925.03
F100%(AC)	972	1072.29	934.81

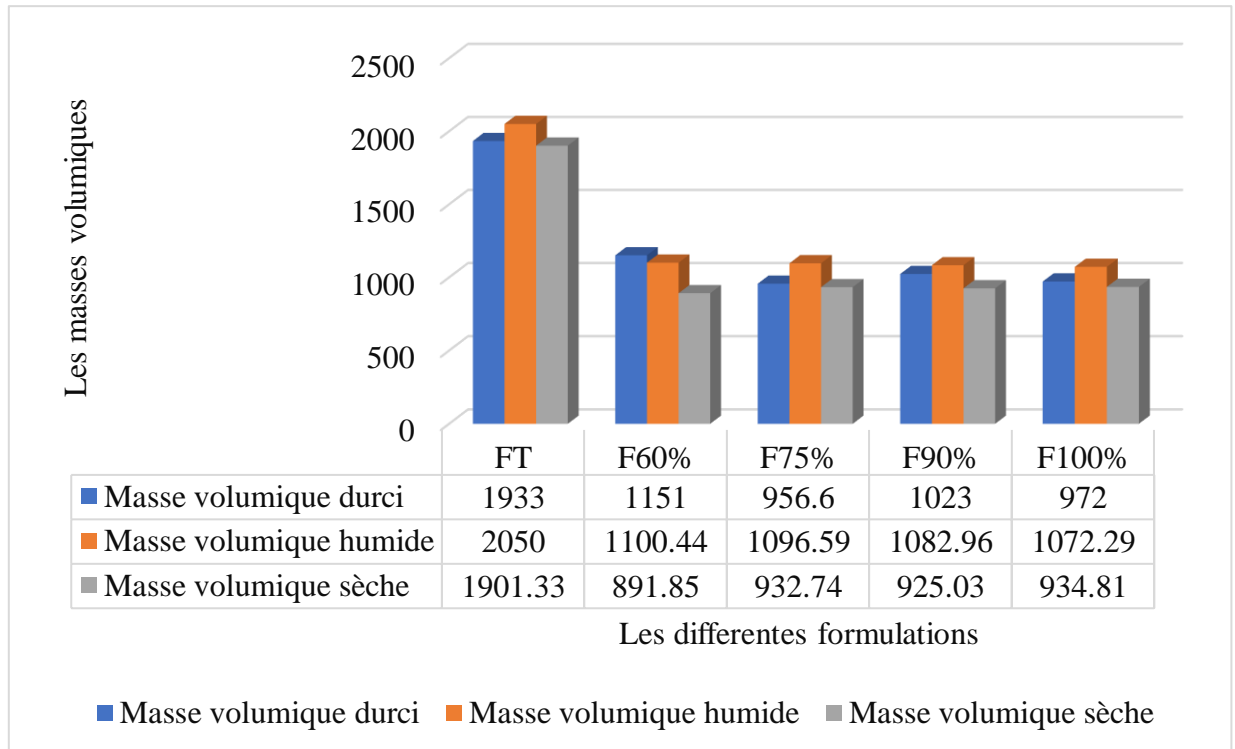


Figure 3.2: Les différentes masses volumiques à l'état durci.

3.3.2.b. La masse volumique durcie des hourdis :

La masse volumique durcie des hourdis est l'un des points les plus importants de notre étude, car cette grandeur donnez-nous un excellent aperçu sur la légèreté de cet élément secondaire. Plus la masse volumique est faible, plus la pièce du hourdis est considérée comme léger. Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Selon les données du tableau, on remarque que l'hourdis contenant des matériaux denses a une masse volumique de 2044 kg/m³ et celle des hourdis légers varie de 1558 à 975 kg/m³ ce qui est inférieur à 2000 kg/m³, ce qui s'accorde avec les recherches antérieures.

La formule F60% présente la masse volumique durcie la plus faible parmi toutes les formulations étudiées, avec une réduction significative de 52.27% par rapport à la formulation traditionnelle (FT). Les formules F75% et F100% offrent également une réduction notable de 41.63% et de 46.77% respectivement. Cependant, la formule F90% présente une réduction légèrement inférieure de 23.78% car cette formule a été surdosé avec le ciment pour assurer la prise et la cohésion des pièces. Cependant, la réduction est légèrement inférieure à 23,78 % en raison de la quantité excessive de ciment ajoutée à la formulation F90% pour assurer le durcissement et l'intégration de la pièce.

L'hourdis qui contient 40% de sable d'argile expansée 0/3mm et 60% de gravier d'argile expansée 3/8 est considérée comme le plus léger et la meilleure formulation en termes de légèreté et diminution du poids, cette diminution de poids est inférieure par rapport les pièces du hourdis léger disponibles dans le marché algérien, qui ont un poids compris entre 6,5 kg et 8 kg.

Tableau 3.3: Masse volumique durcie des différents hourdis.

Formule	Poids (Kg)	Masse volumique durci (Kg/m ³)	Réduction (%)
FT	10.9	2044	Référence
F60%(AC)	5.20	975.61	52.27
F75%(AC)	6.37	1193.25	41.63
F90%(AC)	8.30	1558	23.78
F100%(AC)	5.8	1088	46.77

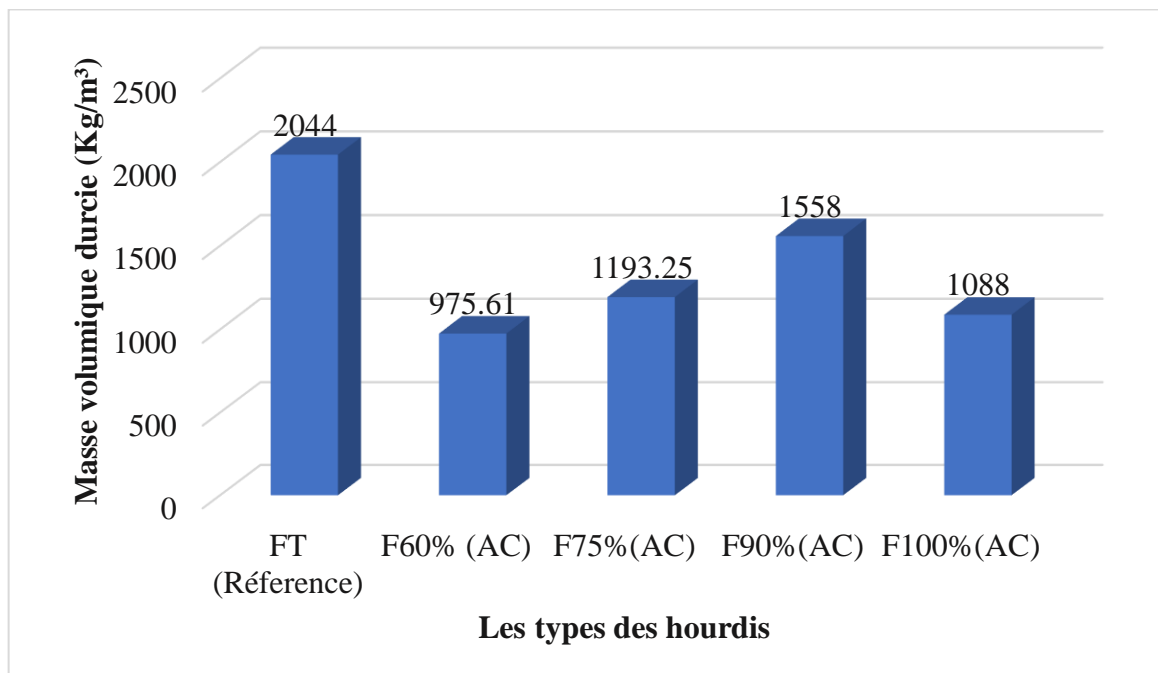


Figure 3.3: Masses volumiques durcies des hourdis.

3.3.2. La résistance à la compression :

3.3.2.a. La résistance à la compression des éprouvettes du béton :

L'une des propriétés les plus importantes pour un béton est sa résistance à la compression ; c'est ce qui nous donne une idée sur la qualité du béton confectionné.

Les résultats d'écrasement des éprouvettes à 2 ,7 et 28 jours sont montrés ci-dessous dans le tableau et la figure suivants.

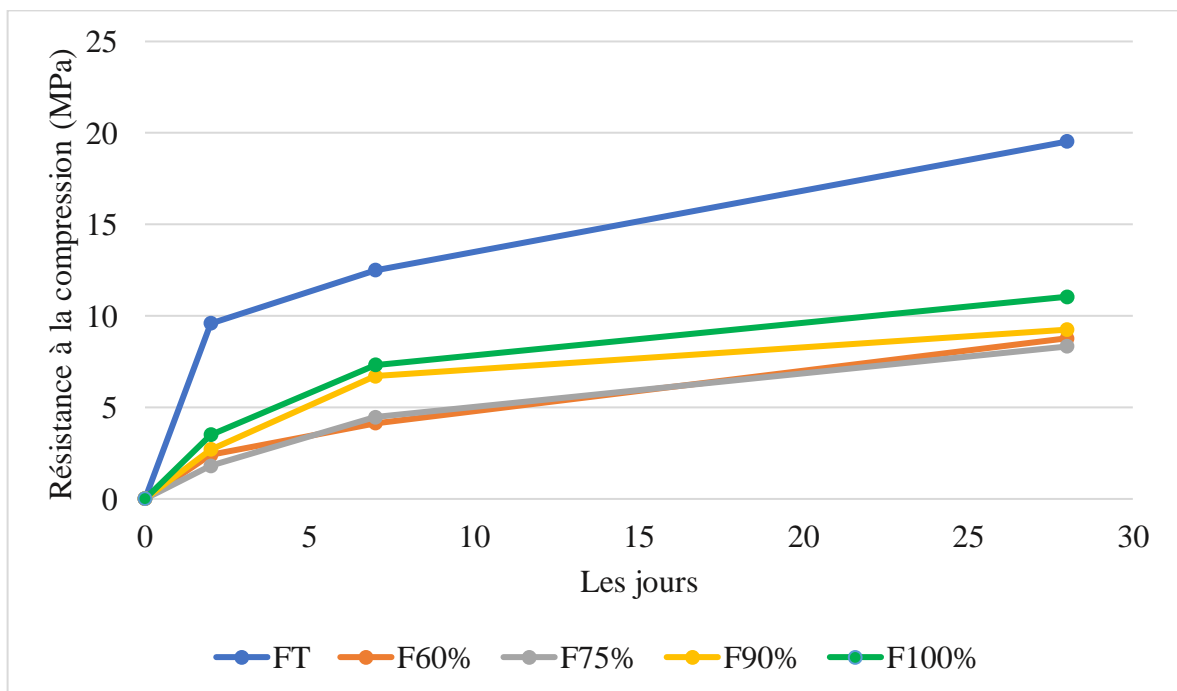
Les bétons à base d'argile expansée sont moins résistants par rapport au béton de référence. Cette diminution de la résistance pourrait être liée à la faible dureté des granulats légers et à sa porosité plus élevée des mélanges.

Selon Rashed [4], le béton léger contenant 100% d'argile expansée présente une résistance à la compression inférieure de 48,73% par rapport au béton de référence. Ces données suggèrent que le béton léger avec une proportion élevée d'argile expansée peut avoir une résistance plus faible que prévu. Nos résultats expérimentaux montrent une réduction de la résistance à la compression variant de 43,43% à 57,34% par rapport au béton traditionnel. Il est essentiel de noter que bien que la substitution totale des granulats naturels par des granulats d'argile expansée diminue la résistance à la compression du béton, cette réduction demeure suffisante pour permettre la fabrication de béton entièrement léger.

Le grand dosage du ciment 52.5 dans la formulation F100% donne la plus grande valeur de résistance à la compression.

Tableau 3.4: Résistance à la compression des bétons.

Formule	Rc 2 jours (MPa)	Rc 7jours (MPa)	Rc 28jours (MPa)
FT	9.60	12.49	19.53
F60%(AC)	2.40	4.14	8.78
F75%(AC)	1.81	4.46	8.33
F90%(AC)	2.7	6.71	9.25
F100%(AC)	3.5	7.32	11.05

**Figure 3.4:** La résistance à la compression des bétons.

3.3.2.b. La résistance à la compression des hourdis :

La résistance à la compression des hourdis est une propriété importante pour la formulation et stockage des pièces du hourdis. Les résultats sont présentés dans le tableau et la figure ci-dessous.

Selon les recommandations, la résistance la compression des pièces du hourdis ne doit pas être inférieure à 4 MPa. Les résultats obtenus sont supérieurs ou égale cette valeur.

La formulation F100% présente une résistance supérieure à celle des autres formulations d'hourdis léger en raison de son dosage élevé de ciment 52.5N, atteignant 380 kg/m³. Ce dosage important permet de compenser le manque de fines dans le mélange, qui résulte de l'absence de petits grains de sable.

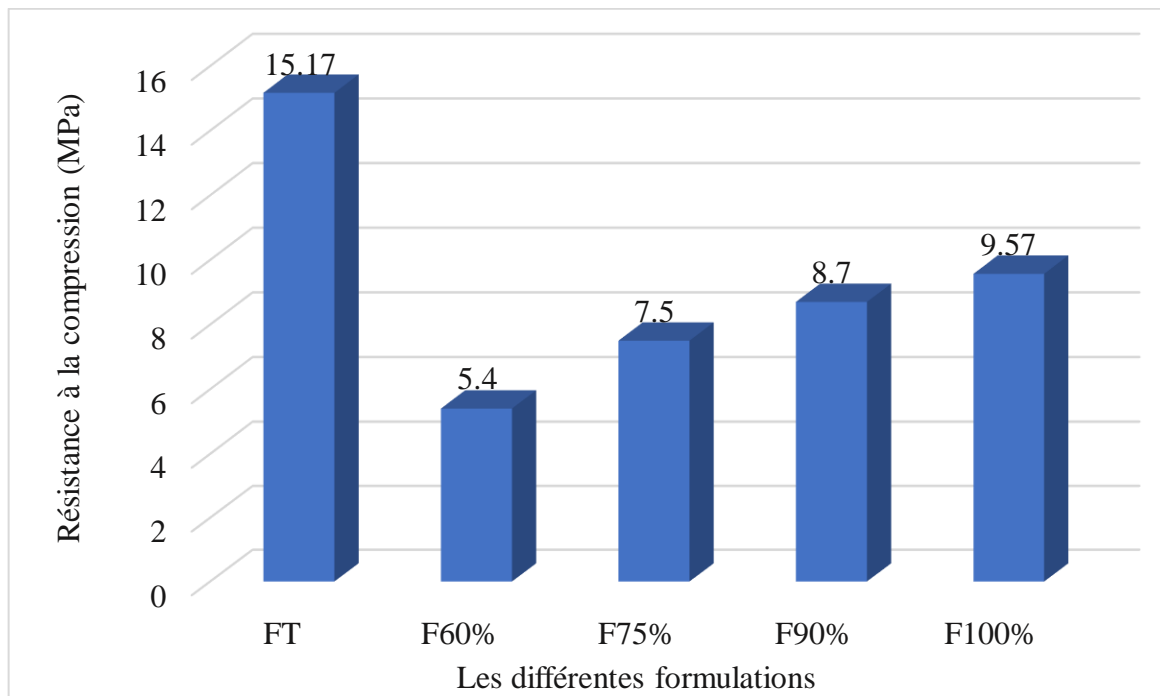
On remarque que les hourdis d'argiles expansée sont moins résistant que l'hourdis traditionnel, on note que le béton traditionnel (60% gravier 3/8 mm + 40% sable 0/4 mm) atteint une résistance à 28 jours de 15.17MPa alors que l'hourdis léger avec la plus faible valeur de résistance composé de (60% gravier AC 3/8 mm + 40% sable AC 0/3 mm) présente une résistance à 28 jours de 5.4 MPa cette différence de résistance est dû directement aux composants des deux mélanges, la résistance du béton est directement liée à la résistance des granulats utilisés.

On note aussi que la présence des fines dans le sable naturel ont permis d'avoir un béton bien compacté que le béton léger qui est composé de sable qui ne contient pas beaucoup de fines.

En comparant les résultats entre les différentes formules des bétons léger est principalement entre la formule (90% 3/8 AC +10%0/3 AC) 8.7MPa et la formule (75%3/8AC+25%0/3AC) 7.5 MPa on note que ce dernier est moins résistant que F90%AC et de la même en la présence du sable dans la F75%AC, cette différence est expliquée par le dosage en ciment 320kg/m³ pour F90%AC et 250kg/m³ pour la formule F75%AC et par le rapport de E/C des deux formule 0.47 pour F90%AC et 0.59 pour la formule F75%AC.

Tableau 3.5: Résistance à la compression des hourdis.

Type d'hourdis	Résistance des hourdis (MPa)
FT	15.17
F60%(AC)	5.4
F75%(AC)	7.5
F90%(AC)	8.7
F100% (AC)	9.57

**Figure 3.5:** Résistance à la compression des différents hourdis.

3.3.3. La conductivité thermique :

La conductivité thermique est une mesure importante pour déterminer les propriétés d'isolation thermique d'un matériau. Plus le béton a une valeur de conductivité thermique basse plus sa capacité d'isolation thermique augmente.

Étant donné l'impossibilité de mesurer directement la conductivité thermique des pièces du hourdis, nous avons effectué des essais sur des éprouvettes ayant les mêmes formulations et compositions que les pièces du hourdis afin d'obtenir une estimation précise de leurs conductivités thermiques et donc leur capacité d'isolation thermique. Le tableau et la figure ci-dessous présentent les résultats de l'essai de conductivité thermique.

Tableau 3.6: La conductivité thermique des différentes formulations.

Formule	Conductivité thermique (W/m.K)	Réduction (%)
FT	1.120	Référence
F60%(AC)	0.185	83.48
F75%(AC)	0.169	84.91
F90%(AC)	0.198	82.32
F100%(AC)	0.1799	83.94

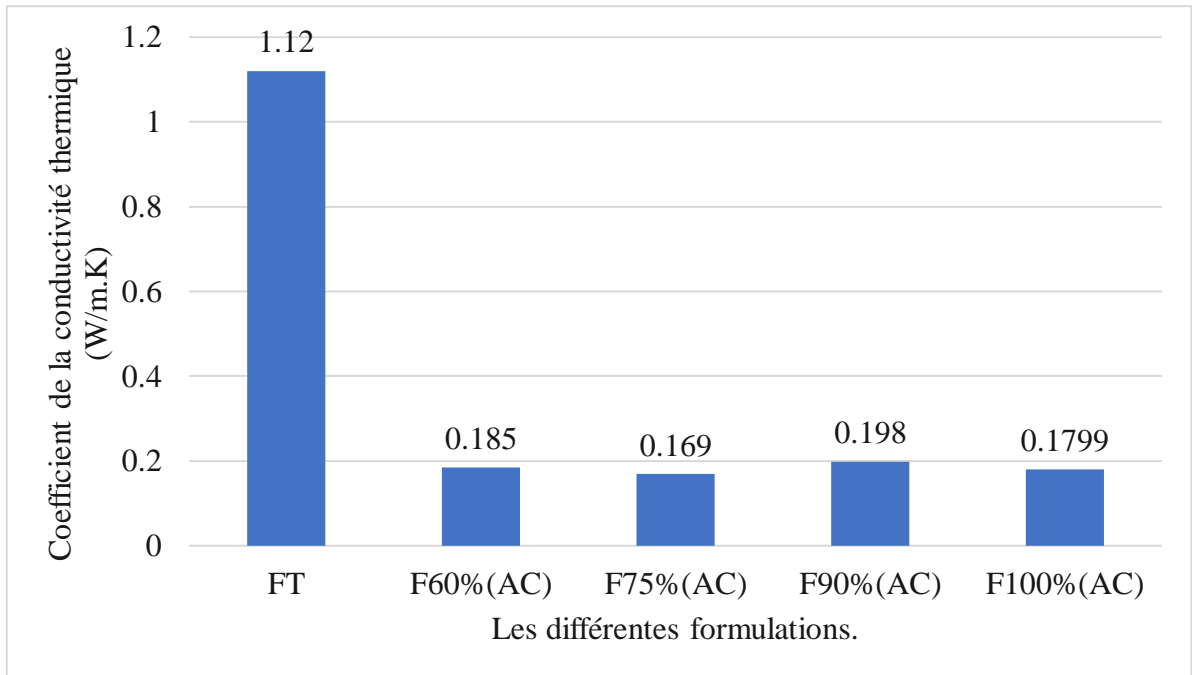


Figure 3.6: Conductivité thermique des différents bétons.

Le tableau montre clairement qu'il y a une diminution de la conductivité thermique. La diminution de la conductivité pour les mélanges de béton léger était de 83.94%, 82.32%, 84.91% et 83.48% pour les formulations F100%(AC), F90%(AC), F75%(AC) et F60%(AC) respectivement. Les réductions pour les mélanges de mortier ordinaire étaient de 28%, 37% et 37% pour respectivement 25%, 50% et 75% de la teneur en sable léger. La diminution de la conductivité est due à la conductivité plus faible du granulats légers par rapport au granulats naturels.

3.3. Corrélation :

- a. La relation entre la masse volumique fraîche et la résistance à 28 jours :

Avec un coefficient de corrélation de 0.903 il existe une relation linéaire positive et forte entre la masse volumique fraîche et la résistance à la compression du béton à 28 jours, on observe alors que plus la masse volumique fraîche est élevée plus sa résistance à la compression augmente, cette corrélation qui est proche de 1 indique une forte association entre ces deux variables.

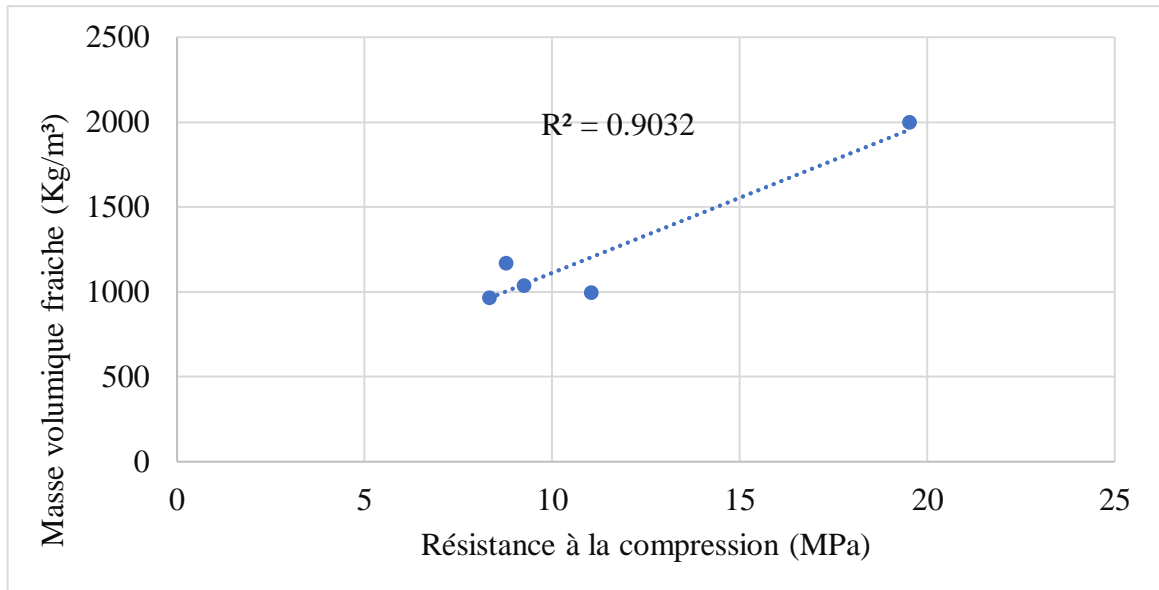


Figure 3.7: Relation entre la masse volumique fraîche et la résistance à la compression des éprouvettes du béton.

- b. La relation entre la masse volumique durcie et la résistance à 28 jours des éprouvettes :

La masse volumique durcie des bétons est positive est fortement corrélée à leur résistance à la compression à 28 jours, avec un coefficient de 0.895 cette corrélation indique qu'il y a une forte relation entre la masse volumique durci et la résistance à la compression des bétons.

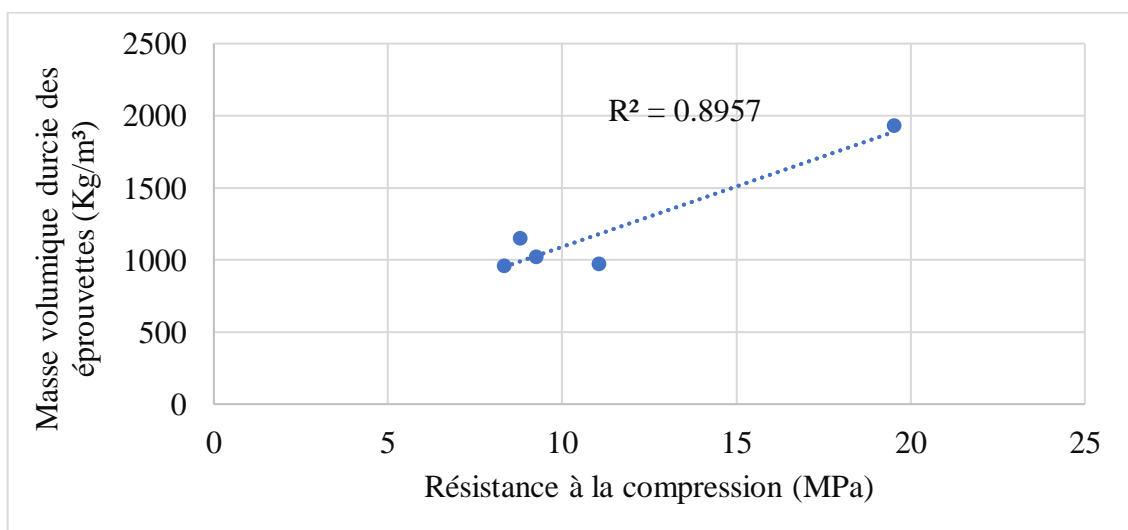


Figure 3.8: Relation entre la masse volumique durcie des éprouvettes et la résistance à la compression.

- c. La relation entre la masse volumique durcie des hourdis et leurs résistances à la compression :

Le coefficient de corrélation entre la masse volumique durcie des hourdis et leur résistance à la compression est égale à 0.7845 ce qui se traduit par une relation linéaire positive entre ces deux paramètres.

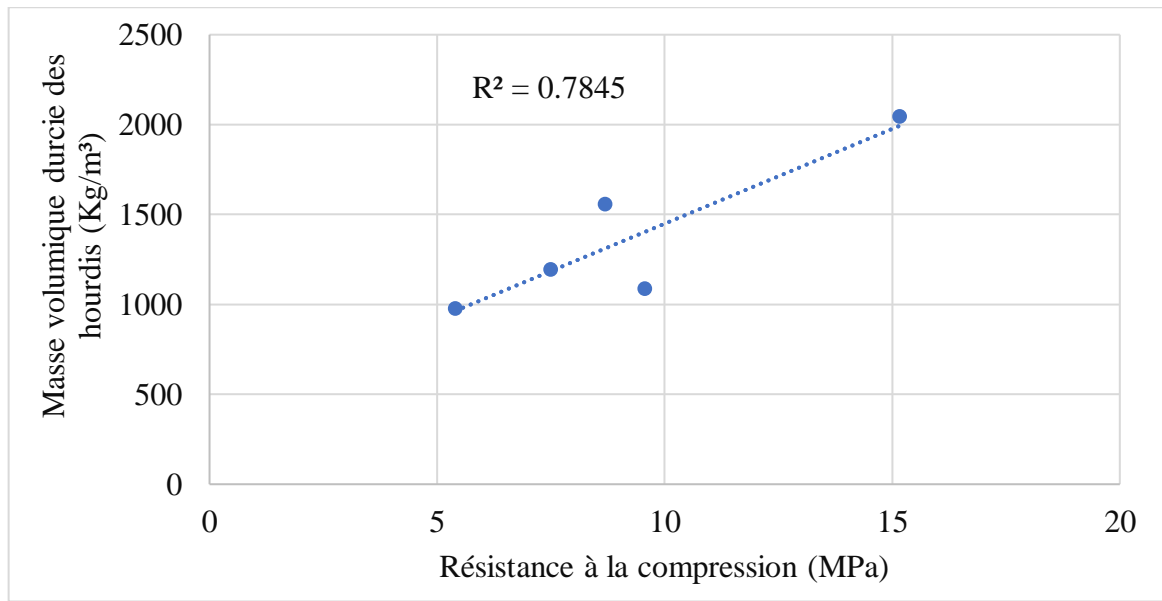


Figure 3.9: Relation entre la masse volumique durcie des hourdis et leur résistance à la compression.

- d. La relation entre la masse volumique durcie des hourdis et les éprouvettes :

Le coefficient de corrélation entre la masse volumique durcie des hourdis et la masse volumique durcie des éprouvettes est égal à 0,66, ce qui se traduit par une relation linéaire positive entre ces deux paramètres. Cette valeur est due aux facteurs de la production des bétons en usine à celle en laboratoire, l'influence de la teneur en humidité des grains, et la différence de la méthode de production qui joue un rôle important dans la compacité du matériau.

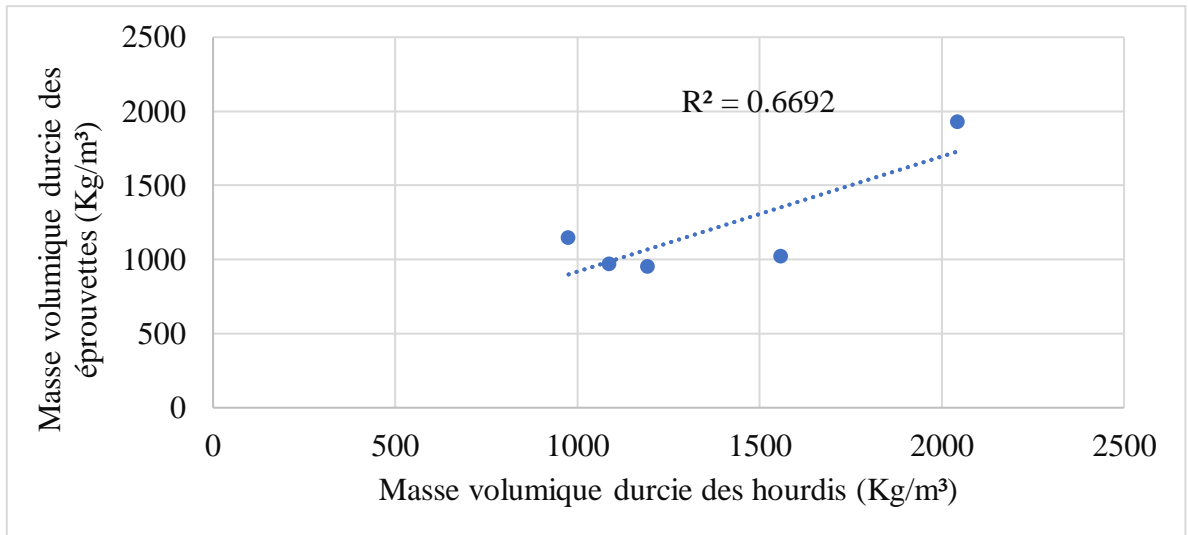


Figure 3.10: Relation entre la masse volumique durcie des hourdis et la masse volumique durcie des éprouvettes.

- e. La relation entre la masse volumique des éprouvettes et leurs conductivités thermiques :

Le coefficient de corrélation entre la masse volumique durci des éprouvettes des différentes formulations du béton et leur masse volumique est égale à 0.969 ce qui se traduit par une relation linéaire positive et forte entre ces deux paramètres, c'est-à-dire que plus la masse volumique durci est élevée plus le béton présente une conductivité thermique élevée, qui influence et diminue l'isolation thermique du matériau.

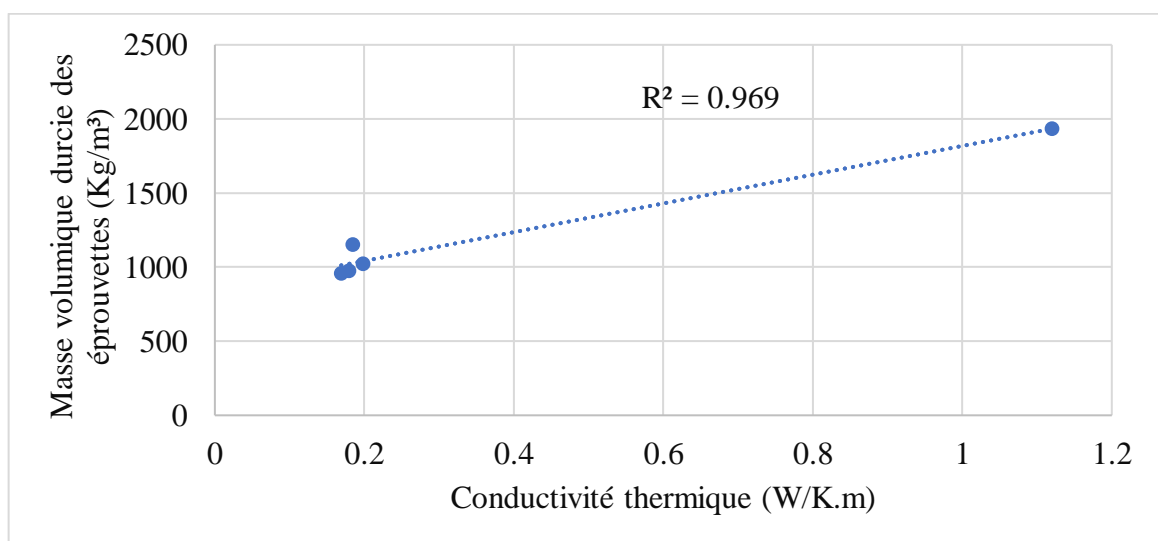


Figure 3.11: Relation entre la masse volumique et la conductivité thermique des différents types de béton.

3.4. Étude technique et économique des hourdis formulés :

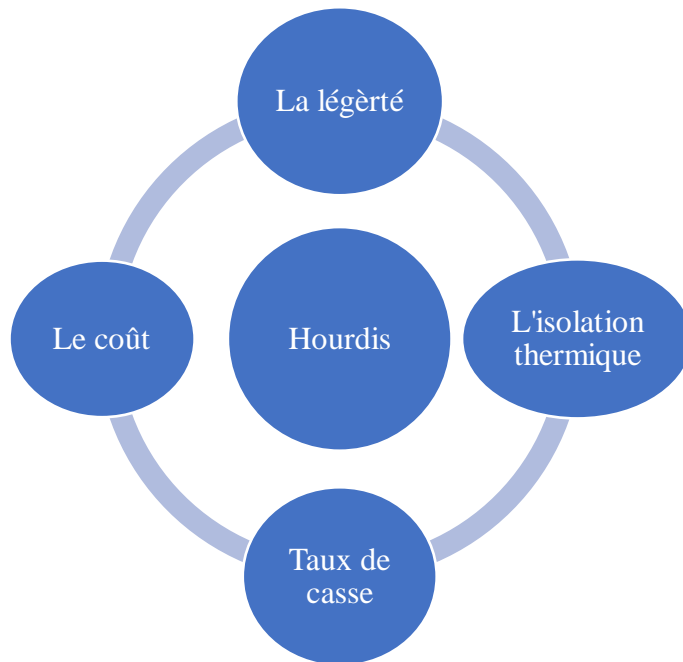


Figure 3.12: Schéma représentatif des différents aspects influents sur la pièce du hourdis.

La diminution de poids et de la masse volumique, la performance thermique, le taux de casse et le coût sont les points clés et les aspects majeurs pour donner une étude complète et une évaluation approfondie sur l'hourdis à base d'argile expansée.

La légèreté et l'isolation thermique du matériau sont liées aux caractéristiques et propriétés des granulats utilisés, la structure poreuse et la densité inférieure d'argile expansée influence directement l'augmentation de ces deux aspects.

Le taux de casse est influencé par facteurs de fabrication, le modèle et les spécificités de la presse vibrante utilisée, son type de vibration unique qui change avec la variation des formulations, le dosage du liant qui est influencé aussi par la variation du sable et son taux d'humidité et les conditions stockage des matériaux et de mise en œuvre.

Le coût du hourdis léger dépend sur deux facteurs :

- La qualité et le coût des constituants.
- Conditionnement d'usine (consommation d'énergie) et la main d'œuvre employée pour gérer l'approvisionnement.

- La fabrication du hourdis dans une usine assez performante (comme la majorité des usines algériennes) est estimée au quotidien à 10 000 pièces.
- Les granulats naturels, sable 0/4mm et gravier 3/8mm sont estimés à 1100DA/t et 900DA/t respectivement, cette estimation inclus leur transport.
- Les granulats d'argile expansée, sable AC 0/3mm et gravier AC 3/8mm sont estimés à 5000DA/m³, cette estimation inclus leur transport.
- Le cout de ciment SARIE 52.5N est de 7000DA/t
- La consommation de l'énergie de la presse du hourdis est estimée à 3000 DA/jour et le prix de la main d'œuvre qui se résume en 4 ouvriers estimer a 1750 DA/jour.
- 186 pièces du hourdis sont fabriquées à partir d'un mètre cube de la formulation.

Tableau 3.7: Coût et taux de casse des différentes formulations.

Formulation	Cout des granulats/m³	Cout du ciment/m³	Cout total du 1m³	Prix sortis d'usine du pièce (DA)	Taux de casse (%)
FT	2404DA	1260DA	3852.68	20.60	0
F60%	9500DA	1400DA	11088.68	59.30	0
F75%	8300DA	1750DA	10238.68	54.75	0
F90%	8900DA	2240DA	11328.68	60.58	83.33
F100%	8750DA	2660DA	11598.68	62.02	0

3.4.1 Etude comparatif :

Le coût de la formulation FT s'élève à environ 21 DA par pièce, tandis que la formulation F60% coûte environ 59 DA par pièce. Bien que la formulation F60% soit plus onéreuse,

cette dépense supplémentaire est compensée par la réduction de poids qu'elle apporte à la structure.

Environ 10 pièces d'hourdis sont nécessaires pour couvrir une section de 1 m². L'utilisation de la formulation F60% permet de réduire d'environ 57 kg par m² par rapport aux pièces traditionnelles, ce qui peut contribuer à des économies à long terme en réduisant la charge structurelle et les besoins en matériaux.

3.5. Conclusion :

Tableau 3.1: Tableau récapitulatif des résultats.

F	Poids unitaire (Kg)	ρ (Kg/m³)	R28 (MPa)	λ (W/m.K)	Prix unitaire (DA)	Taux de case %
FT	10.9	2044	15.17	1.12	20.60	0
F60%	5.2	975.61	5.4	0.185	59.30	0
F75%	6.37	1193.25	7.5	0.169	54.75	0
F90%	8.3	1558	8.7	0.198	60.58	83.33
F100%	5.8	1088	9.57	0.179	62.02	0

Dans cette étude, la fabrication des hourdis à base d'argile expansée, leurs caractéristiques et propriétés physiques, mécaniques et thermiques ont été étudiés.

- ✓ La masse volumique et le poids pour l'hourdis de référence est bien supérieure à tous les hourdis légers fabriqués.
- ✓ La résistance à la compression des hourdis légers est également inférieure à celle du hourdis traditionnel. Ces valeurs de résistance permettent au hourdis de tenir ensemble et de ne pas se désagréger et d'effondrer.

- ✓ Meilleure capacité d'isolation thermique. L'utilisation des granulats d'argile expansée uniquement dans le béton permet une réduction de la conductivité thermique compris entre 82.32 à 84.91% par rapport le béton de référence.
- ✓ L'élimination de la formulation F90% car elle contient un taux de casse très élevé.
- ✓ Le prix des différentes formulations légers varie entre 54.75DA à 62.02DA par pièce, Cette hausse de prix par rapport à l'hourdis traditionnel est due par la quantité de ciment dosé et le coût élevé des granulats d'argile expansée.

Conclusion générale :

Cette étude a permis de développer des blocs de bétons légers à base de granulats d'argile expansée et de comparer leurs propriétés avec celles des bétons ordinaires ; en procédant par la réalisation d'une série d'essais physiques et mécaniques, à partir des résultats obtenus on conclut :

La revue bibliographique montre que les caractéristiques des agrégats légers affectent directement celles des bétons légers, tant à l'état frais que durci, cette diminution varie selon la composition du béton léger et le dosage de ciment.

L'étude expérimentale a permis de confirmer les propriétés physiques, thermique et mécaniques d'argile expansée, en mettant en évidence sa capacité à réduire le poids total et l'augmentation de la légèreté des blocs de béton tout en conservant des performances satisfaisantes.

Les bétons légers ont une faible conductivité thermique (conductivité thermique d'environ $(0,16 - 0,19 \text{ w/m}\cdot\text{K})$).

Les résultats de cette étude soulignent la capacité de l'argile expansée à être utilisée uniquement pour la fabrication des matériaux de construction durables, en limitant le coût d'autres matériaux.

Son utilisation peut augmenter l'isolation thermique des bâtiments tout en réduisant le poids, les charges des structures, ce qui permet de construire sur des sols à faible capacité portante, alors une réduction des dimensions des fondations et la quantité d'acier nécessaire. Ce qui conduit à économiser le coût total de la construction.

Perspectives et recommandations :

- Le rajout d'un faible pourcentage de sable 0/1 qui permet d'avoir plus de résistance à la compression des pièces d'hourdis.
- Utilisation d'une presse adaptée pour des granulats léger accompagnée d'une vibration adaptée, est essentielle pour obtenir des résultats optimaux.
- Pour augmenter l'isolation thermique des hourdis, il est recommandé d'utiliser le produit Airium comme une solution d'isolation plus verte, plus saine et plus abordable, une mousse minérale 100% local.

- En Algérie, l'aspect de l'hourdis est un argument de vente important et il varie d'une région à l'autre. Dans le centre et l'est du pays, on préfère généralement un aspect granulé, tandis que dans l'ouest, on privilégie un aspect lisse qui correspond aux préférences esthétiques. L'aspect des hourdis est fortement influencé par la quantité de fines (ciment ou sable) présentes dans la composition du béton. Les fines peuvent modifier la surface et la texture du béton. Une quantité plus élevée de fines peut donner aux hourdis un aspect plus lisse, tandis qu'une quantité plus faible peut donner un aspect plus granulé.
- Effectuer une étude de conception et de modélisation d'un bâtiment en intégrant le poids d'hourdis léger développé dans les calculs structuraux et les modèles de charge des bâtiments. Cela peut nécessiter des ajustements dans les logiciels de calcul et les modèles de charge afin de refléter correctement les caractéristiques du matériau.

Annexe 1 : Essai analyse chimique par XRF EN 1744

- a. Détermination de la perte au feu :

Appareillage :

- Balance de précision de 0.1mg.
- Verre de montre.
- Dessiccateur.
- Four à moufle $975^{\circ}\text{C} \pm 25^{\circ}\text{C}$.
- Granulats d'argile expansée séchées à 105°C (Argile avant cuisson et argile expansée).
- Creuset.
- Broyeur.

Mode opératoire :

- Broyer les échantillons, une partie pour déterminer PAF et l'autre pour l'analyse chimique XRF.
- Peser le creuset à utiliser soit m1.
- Ajouté 1 ± 0.05 g d'argile expansée.
- Peser le creuset et son contenu soit m2.
- Porter le creuset avec le couvercle et le contenu dans un four à moufle à $975^{\circ}\text{C} \pm 25^{\circ}\text{C}$ pendant 5 minutes.
- Retirer le couvercle et le laisser le creuset encore 15 min dans le four.
- Après écoulement des 20min ; sortir le creuset du four.
- Mettre le creuset dans un dessiccateur jusqu'à stabilisation a la température ambiante.
- Peser m3.



Détermination de la perte au feu.

b. Analyse chimique XRF :

Appareillage :

- Creuset en platine (perleuse).
- Moniteur de fusion (Fluxana).
- Spectromètre XRF.
- Logiciel d'analyse.

Mode opératoire :

- Broyez soigneusement l'argile expansée pour obtenir des particules fines.
- Mélanger de l'échantillon de l'argile expansée avec un liant approprié qui permet de lier les particules fines d'argile expansée ensemble, formant ainsi une perle solide et

cohésive. Cela facilite la manipulation de l'échantillon et évite la dispersion des particules pendant l'analyse.

- Placez le mélange d'échantillon et de liant dans un creuset approprié en platine.
- Appliquez une pression sur le mélange à l'aide d'une presse hydraulique pour former des perles solides. La pression doit être suffisamment élevée pour assurer une cohésion adéquate du mélange.
- Calcination des perles formées à une température appropriée pour favoriser la fusion et la solidification du liant. 1050C pendant 1h.
- Laissez les perles refroidir et durcir à température ambiante.
- Le temps et les conditions du refroidissement doivent être constants ; risque de cristallisation (CaO si plus de 50%).
- Une fois les perles d'argile expansée préparées, elles peuvent être utilisées pour l'analyse chimique par XRF. Les perles sont placées dans l'appareil XRF, excitées par un faisceau d'électrons et les rayons X émis sont détectés et analysés pour déterminer la composition chimique des granulats.
- Les résultats apparaissent sous forme de tableau.



Essai XRF pour l'argile expansée.

Annexe 2 : Fiche technique pour l'hourdis à base des granulats légers

FICHE TECHNIQUE HOURDIS F60%			
SELON LA NORME NF EN 15037-1			
<u>1- Spécifications mécaniques</u>			
Désignation		Valeur obtenues	
Masse volumique		- 976 Kg/m ³	
Conductivité thermique		- 0.185 W/m.K	
Résistance à la compression		- 5.4 MPa	
Aspect		- Pas de défauts, épaufrure et fissures	
<u>2 – Spécifications géométriques</u>			
Dénomination	Longueur	Largeur	Hauteur
Hourdis	52	20	15
<u>3 – Spécifications techniques</u>			
Couleur	Ciment	Sable	Gravier
Gris	52.5N	Argile expansée concassée 0/3mm	Argile expansée concassée 3/8mm

FICHE TECHNIQUE HOURDIS F75%

SELON LA NORME NF EN 15037-1

1- Spécifications mécaniques

Désignation	Valeur obtenues
Masse volumique	- 1193 Kg/m ³
Conductivité thermique	- 0.169 W/mK
Resistance à la compression	- 7.5 MPa
Aspect	- Pas de défauts, épaufrure et fissures

2 – Spécifications géométriques

Dénomination	Longueur	Largeur	Hauteur
Hourdis	52	20	15

3 – Spécifications techniques

Couleur	Ciment	Sable	Gravier
Gris	52.5N	Argile expansée concassée 3/8mm	Argile expansée concassée 3/8mm

FICHE TECHNIQUE HOURDIS F100%

SELON LA NORME NF EN 15037-1

1- Spécifications mécaniques

Désignation	Valeur obtenues
Masse volumique	- 1088 Kg/m ³
Conductivité thermique	- 0.179 W/m-K
Resistance à la compression	- 9.57 MPa
Aspect	- Pas de défauts, épaufrure et fissures

2 – Spécifications géométriques

Dénomination	Longueur	Largeur	Hauteur
Hourdis	52	20	15

3 – Spécifications techniques

Couleur	Ciment	Sable	Gravier
Gris foncé	52.5N	/	Argile expansée concassée 3/8mm

Annexe 3 : Calcul économique d'hourdis

Exemple 1 « Formulation FT traditionnelle » : 40% Sable 0/4 + 60% Gravier 3/8

Granulat	Prix
Sable 0/4	5000DA/t
Gravier	800DA/t

Pour déterminer le cout des granulats, le loi $\rho_{apparente} = \frac{Masse}{Volume}$ est nécessaire.

<p>- Pour le sable 0/4 :</p> <p>Car le prix est par tonne, on doit calculer la masse nécessaire pour remplir 0.4m³(40%), on utilise la loi de la masse volumique apparente.</p> <p>1. $\rho_{\text{sable 0/4 app}} = \frac{Masse}{Volume}$</p> <p>2. Masse = ρ X Volume.</p> <p>3. Masse = 1084Kg.</p> <p>Pour 1084Kg de sable 0/4, le cout est 1084DA</p>	<p>- Pour le gravier 3/8 :</p> <p>Car le prix est par tonne, on doit calculer la masse nécessaire pour remplir 0.6m³(60%), on utilise la loi de la masse volumique apparente.</p> <p>1. $\rho_{\text{gravier 3/8 app}} = \frac{Masse}{Volume}$</p> <p>2. Masse = ρ X Volume.</p> <p>3. Masse = 1650Kg.</p> <p>Pour 1650Kg de gravier, le cout est 1320DA</p>
--	--

Le cout de dosage 180Kg/m³ ciment :

Quantité	1000Kg	180Kg
Prix	7000DA	1260DA

Pour 1m³ de la formulation traditionnelle d'hourdis :

Le prix des différents constituants est de **3664DA**.

L'usine fabrique environ 53m³ du hourdis (10 000 pièces) avec un cout des constituants d'environ **194192DA**. Le cout de la consommation d'énergie de la presse (3000DA/Jour) et les 4 main d'œuvres (7000DA/Jour) doivent être ajoutés.

Le coût quotidien total d'usine est d'environ **204192 DA**.

1m³ produise environ 187 pièces d'hourdis. Donc le cout de la pièce d'hourdis traditionnelle (Sans intérêt bénéficiaire) est de **20.60DA**.

Exemple 2 « Formulation F60 légère » : 40% Sable 0/4 + 60% Gravier 3/8

Granulat	Prix
Sable 0/4	5000DA/m ³
Gravier	5000DA/m ³

Pour déterminer le cout des granulats, les lois $\rho_{apparente} = \frac{Masse}{Volume} \rho_{absolue} = \frac{Masse}{Volume}$ sont nécessaires.

<p>- Pour le sable AC 0/3 :</p> <p>Car le prix est par le volume, on doit calculer premièrement la masse nécessaire pour remplir 0.4m³(40%), on utilise la loi de la masse volumique absolue.</p> <p>1. $\rho_{\text{absolue}} \text{ sable AC 0/3} = \frac{\text{Masse}}{\text{Volume}}$</p> <p>2. Masse = $\rho_{\text{absolue}} \times \text{Volume}$.</p> <p>3. Masse = 628.8Kg.</p> <p>Pour 40% de volume, la quantité de sable est de 628.8Kg</p> <p>En utilisant la loi de la masse volumique apparente on peut déterminer le volume apparent avec le cout 5000DA/m³.</p> <p>1. $\rho_{\text{app}} \text{ sable AC 0/3 AC} = \frac{\text{Masse}}{\text{Volume}}$</p> <p>2. Volume apparent = $\frac{M}{\rho_{\text{app}}}$</p> <p>3. Volume apparent = 0.85 m³.</p> <p>Pour 0.85 m³ de sable AC 0/3, le cout est 4250DA</p>	<p>- Pour le gravier AC 3/8 :</p> <p>Car le prix est par le volume, on doit calculer premièrement la masse nécessaire pour remplir 0.4m³(40%), on utilise la loi de la masse volumique absolue.</p> <p>1. $\rho_{\text{absolue}} \text{ gravier AC 3/8} = \frac{\text{Masse}}{\text{Volume}}$</p> <p>2. Masse = $\rho_{\text{absolue}} \times \text{Volume}$.</p> <p>3. Masse = 573Kg.</p> <p>Pour 60% de volume, la quantité de gravier est de 573Kg</p> <p>En utilisant la loi de la masse volumique apparente on peut déterminer le volume apparent avec le cout 5000DA/m³.</p> <p>1. $\rho_{\text{app}} \text{ gravier AC 0/3} = \frac{\text{Masse}}{\text{Volume}}$</p> <p>2. Volume apparent = $\frac{M}{\rho_{\text{app}}}$</p> <p>3. Volume apparent = 1.05 m³.</p> <p>Pour 1.05 m³ de gravier AC 0/3, le cout est 5250DA</p>
--	---

Le cout de dosage 180Kg/m³ ciment :

Quantité	1000Kg	200Kg
Prix	7000DA	1400DA

Pour 1m³ de la formulation F60% d'hourdis léger :

Le prix des différents constituants est de **10900DA**.

L'usine fabrique environ 53m³ du hourdis (10 000 pièces) avec un cout des constituants d'environ **577700DA**. Le cout de la consommation d'énergie de la presse (3000DA/Jour) et les 4 main d'œuvres (7000DA/Jour) doivent être ajoutés.

Le coût quotidien total d'usine est d'environ **587700 DA**.

1m³ produise environ 187 pièces d'hourdis. Donc le cout de la pièce d'hourdis F60 (Sans intérêt bénéficiaire) est de **59.30DA**.

Bibliographie

- [1] L. Bello, *Mise au point d'une méthodologie pour formuler de nouveaux bétons auto-plaçants légers et durables*, Génie civil. Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, 2014.
- [2] L. Berntsson. S. Chandra, *Lightweight Aggregate Concrete*, 2002, pp. 369-400.
- [3] M. Arnould, VIRLOGUEUX Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, *Granulatset Bétons Légers*, 1986.
- [4] A. M. Rashad, «Lightweight expanded clay aggregate as a building material – An overview,» *Construction and Building Materials*, vol. 170, pp. 757-775, 2018.
- [5] R. Vijayalakshmi et S. Ramanagopal, «Structural Concrete using Expanded Clay Aggregate: A Review,» *Indian Journal of Science and Technology*, vol. 16, n° %111, 2018.
- [6] H. Michala et H. Rudolf, «Durability of Lightweight Expanded Clay Aggregate Concrete,» *Procedia Engineering*, vol. 65, pp. 2-6, 2013.
- [7] R. William, G. Gregor et P. Klaus, «In-situ thermo-mechanical testing of fly ash geopolymer concretes made with quartz and expanded clay aggregates,» *Cement and Concrete Research*, vol. 80, pp. 33-43, 2016.
- [8] La norme NF EN 206-1, Béton Partie 1 : Spécification, performances, production et conformité, Avril 2004.
- [9] G. Mishra, «What is lightweight concrete? -Types, Uses and Advantages,» [En ligne]. Available: <https://theconstructor.org/concrete/lightweight->

concrete/1670/#Types_of_Lightweight_Concrete_Based_on_Density_and_Strength.
[Accès le 20 04 2023].

- [10] ACI213R-87. Guide for structural lightweight aggregate concrete, ACI manual of concrete practice, Detroit, michigan, 1994.
- [11] S. BOUAZIZ, *Caractérisation et Modélisation des paramètres physico-hygro-mécaniques d'un béton léger à base de granulats composites*, Département de Génie Civil, Université de Tizi Ouzou - Mouloud Mammeri.
- [12] J. H. Mohammed et A. J. Hamad, «Materials, properties and application review of Lightweight concrete,» *Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia.*, vol. 37, n° 2, pp. 10-15, 2014.
- [13] M. SHINK, *Compatibilité élastique, comportement mécanique et optimisation des bétons de granulats légers*, Thèse présentée à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval, Québec (2003)., 2003.
- [14] Y. Agrawal, T. Gupta, R. Sharma, N. Panwar et S. Siddique, «A Comprehensive Review on the Performance of Structural Lightweight Aggregate Concrete for Sustainable Construction,» *Constr. Mater*, vol. 1, n° 1, pp. 39-62, 2021.
- [15] S. M. Selman et Z. K. Abbas, «The Use of Lightweight Aggregate in Concrete: A Review,» *Journal of Engineering*, vol. 28, n° 11, pp. 1-13, 2022.
- [16] A. H. K. Lotfy et M. Lachemi, «Lightweight Self-consolidating Concrete with Expanded Shale Aggregates: Modelling and Optimization,» *International Journal of Concrete Structures and Materials*, vol. 9, p. 185–206, 2015.
- [17] G. a. W. H. C. L. JOHN MINNICK, «Lightweight concrete aggregate from sintered fly ash,» 1970.
- [18] A. G. Celik, A. M. Kilic et G. O. Cakal, «Expanded perlite aggregate characterization for use as a lightweight construction raw material,» *Physicochem. Probl. Miner. Process*, vol. 49, n° 2, p. 689–700, 2013.

- [19] A. L. Abraham et R. P. Mohan, «Study on Strength Properties of Concrete using Pumice Powder Pozzolan and Polypropylene Fibers,» chez *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Kerala, India, 2020.
- [20] «PUMICE APPLICATIONS Lightweight Pumice Aggregate,» [En ligne]. Available: <https://hesspumice.com/uses-aggregate.html>. [Accès le 14 Mai 2023].
- [21] O. Kropidłowska, «Application of sawdust concrete in construction,» *Budownictwo i Architektura*, vol. 21, n° 3, pp. 5-18, 2022.
- [22] A. A. Muttar, «Improving The Mechanical Properties of No-Fines Concrete,» *Journal of Babylon University/Engineering Sciences*, vol. 21, n° 2, pp. 548-557, 2013.
- [23] J. Cox, J. Sizaire, P. Meulders, E. Van Overmeire et A. & Ingelaere, *Le béton cellulaire, matériau d'avenir.*, 2005.
- [24] W. Yu, X. Liang, F.-W. Ni, A. Oyeyi et S. Tighe, «Characteristics of Lightweight Cellular Concrete and Effects on Mechanical Properties,» *materials*, vol. 13, n° 12, 2020.
- [25] M. Constant, «*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, 2000.
- [26] A. Manish et K. Chandan, «CELLULAR LIGHTWEIGHT CONCRETE,» *International*.
- [27] ACI 213R-03, Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete.
- [28] A. M. Neville et J. J. Brooks, *Concrete Technology*, 1987.
- [29] B. Linda, *Comportement Structurel du béton léger à base d'argile expansée de Bouinan*, Ecole Nationale Polytechnique, Département Genie Civil, 1991.

- [30] S. Nadesan et P. Dinakar, «Structural concrete using sintered flyash lightweight aggregate: A review,» *Construction and Building Materials*, vol. 154, pp. 918-944, 2017.
- [31] D. Rym et D. Ferial, *Formulation de bétons légers à base de granulats d'argile expansée*, MEMOIRE DE MASTER, Département de Génie civil, UNIVERSITE DE BLIDA 1, 2021.
- [32] S. Bensalem, M. L. K. Khouadjia, K. Abdou, A. A. Belkadi et O. Kessal, «Experimental Evaluation of Workability Compressive Strength and Freeze-Thaw Durability of Concrete Containing Expanded Clay Aggregates,» *Aceh Int. J. Sci. Technol.*, vol. 11, n° 2, pp. 145-154, 2022.
- [33] F. Wegian, «Strength properties of lightweight concrete made with LECA grading,» *Australian Journal of Civil Engineering*, vol. 10, n° 1, pp. 11-22, 2012.
- [34] Vivek, S. S., Karthikeyan, B., Kanna, G. R., Selvaraj, S. K., Palanisamy, P., & Adane, T. M, «Study on Fresh and Mechanical Properties of Polyblend Self-Compacting Concrete with Metakaolin, Lightweight Expanded Clay Aggregate, and SAP as Alternative Resources,» *Advances in Civil Engineering*, p. 13, 2022.
- [35] D. H. Darayani, «Split Tensile Strength of Self Compacting Concrete with Artificial Lightweight Aggregate,» *Civilla : Jurnal Teknik Sipil Universitas Islam Lamongan*, vol. 07, 2022.
- [36] C. Abdelhamid, «Flexural Response of Concretes Containing Natural Lightweight Aggregates,» chez *International Conference World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2013.
- [37] M. E. Dilli, H. N. Atahan et C. Sengül, «A comparison of strength and elastic properties between conventional and lightweight structural concretes designed with expanded clay aggregates,» *Construction and Building Materials*, vol. 101, pp. 260-267, 2015.
- [38] G. DREUX et J. FESTA, «Nouveau guide du béton et de ses constituants». .

Eyrolles. ., 8ème Édition éd., Mai 1998.

- [39] J. A. Bogas, R. Nogueira et N. G. Almeida, «Influence of mineral additions and different compositional parameters on the shrinkage of structural expanded clay lightweight concrete,» *Materials and Design*, vol. 56, pp. 1039-1048, 2014.
- [40] T. Uygunog̃lu et I. B. Topçu, «Thermal expansion of self-consolidating normal and lightweight aggregate concrete at elevated temperature,» *Construction and Building Materials*, vol. 23, p. 3063–3069, 2009.
- [41] S. Real, J. A. Bogas, M. G. Gomes et B. Ferrer, «Thermal conductivity of structural lightweight aggregate concrete,» *Magazine of Concrete Research*, vol. 68, n° 15, pp. 798-808, 2016.
- [42] H. Sousa, A. C. et A. Melo, «A new sound insulation lightweight concrete masonry block. Design and experimental characterization,» chez *13th International Brick and Block Masonry Conference* , Amsterdam, July 4-7, 2004.
- [43] SEAC : Planchers hourdis les principes fondamentaux, le livre : choix et technique édition N°7, SEAC fabriquée les planchers et l'hourdis en béton2011., 2011.
- [44] CERTIFICAT DE QUALITE, Caractéristiques physico-chimiques du ciment. LAFARGE (2021).
- [45] La norme NF P15-435, Méthodes d'essais des ciments - Détermination de la masse volumique..
- [46] La norme NA 231, Méthodes d'essais des ciments - Détermination de la finesse, (2006).
- [47] La norme NA 230, Ciments - Détermination du temps de prise et de la stabilité, (2010)..
- [48] La norme NA 232, Ciments - Détermination de l'expansion à chaud et à froid (Lechatelier)..

- [49] La norme NF EN 196-9, Méthodes d'essai des ciments - Partie 9 : chaleur d'hydratation - Méthode semi-adiabatique, (2010)..
- [50] La norme NA 234, Méthodes d'essais des ciments - Détermination des résistances mécaniques. (2007)..
- [51] La norme NF EN 1097-6, essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats partie 6 : détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau (juin 2021)..
- [52] La norme NF EN 1936, Méthodes d'essai des pierres naturelles - Détermination des masses volumiques réelle et apparente et des porosités ouvertes et totale..
- [53] La norme EN NF P18-598, Granulats, Equivalent de sable,(octobre1991)..
- [54] La norme NA 1948, Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Qualification des fines - Essai au bleu de méthylène..
- [55] La norme NA 2607, Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 1: Détermination de la granularité - Analyse granulométrique..
- [56] La norme NA 5125, Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Détermination de la forme des granulats - Coefficient d'aplatissement..
- [57] La norme NF EN 1744-1, Essais pour déterminer les propriétés chimiques des granulats - Partie 1 : analyse chimique..
- [58] La norme NF P18-404, Bétons - Essais d'étude, de convenance et de contrôle - Confection et conservation des éprouvettes..
- [59] La norme NA 5093, Essai pour béton durci - Confection et conservation des éprouvettes pour essais de résistance..
- [60] La norme NA 5074, Essais pour béton durci - Forme, dimensions et autres exigences aux éprouvettes et aux moules..

- [61] La norme NA 436, Béton frais compacté - détermination de la masse volumique..
- [62] La norme NA 435, Béton durci - Détermination de la masse volumique..
- [63] La norme NA 427, Bétons - Détermination de la résistance à la compression des éprouvettes..
- [64] La norme NF EN 993-15, Méthodes d'essai pour produits réfractaires façonnés denses - Partie 15 : détermination de la conductivité thermique par la méthode du fil chaud (parallèle)..