

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

People's Democratic Republic of Algeria

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

جامعة عبد الحميد ابن باديس مستغانم

Ministry of Higher Education and Scientific Research

Abdelhamid Ibn Badis University of Mostaganem

كلية العلوم و التكنولوجيا

قسم الهندسة المدنية

Faculty of Sciences and Technology



Department of Civil Engineering

N° d'ordre : M/GC /2026

Mémoire de Master académique



Filière : Génie Civil

Spécialité : Structures

Elaboration et étude des bétons à base de granulats d'argile expansés

Présenté par :

CHAANEBI Fatiha

Soutenu le 18 juin 2026 devant le jury composé de :

Présidente :	MOSTEFA Fouzia	M.C.B	UMAB Mostaganem
Examinatrice :	GUERZOU Tourkia	M.C.B	UMAB Mostaganem
Encadrant :	MEBROUKI Abdelkader	Professeur	UMAB Mostaganem
Invité ;	MARREF Mohamed	Directeur GICA	Unité Mostaganem

Année Universitaire : 2025 / 2026

Remerciements :

Tout d'abord, Je remercie Dieu, le Tout Puissant, de m'avoir donné la volonté et le courage afin d'arriver à la finalité de ce modeste travail.

Ensuite, Je remercie tous les membres de ma famille qui ont participé de près ou de loin pour m'encourager et m'aider dans mon projet.

Je tiens aussi à remercier les deux entreprises qui ont soutenu ce projet : L'entreprise **ALGEXPAN** qui nous a fourni en granulats d'argiles expansées et L'entreprise **GICA** – unité de Mostaganem qui nous a fourni en ciment et en granulats naturels et nous a ouvert son laboratoire pour les essais.

Un grand merci à notre encadrant, le Professeur MEBROUKI Abdelkader. Je lui adresse toute ma reconnaissance pour ses réflexions scientifiques et ses nombreux conseils qui ont contribué au bon avancement de ce travail. J'ai particulièrement apprécié sa disponibilité et son soutien.

J'adresse aussi mes vifs remerciements à chacun des membres du jury,

Docteur MOSTEFA Fouzia et Docteur GUERZOU Torkia pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de juger ce travail.

Je remercie sincèrement Monsieur KHLIFA Belkacem Responsable du laboratoire sol et géotechnique.

Je tiens aussi à remercier tous les Enseignants du Département de Génie Civil qui ont contribué à ma formation.

Dédicace :

À la mémoire de mes chers parents,

Vous n'êtes plus là pour partager ce moment avec moi, mais vous avez été présents dans chacun de mes efforts, chacune de mes réussites et chacun de mes pas. Tout ce que je suis aujourd'hui porte l'empreinte de votre amour, de vos sacrifices et de votre éducation. Que Dieu vous accorde Son infinie miséricorde et vous accueille dans Son vaste Paradis.

À ma chère sœur et à mon cher beau-frère,

Merci pour votre amour, votre soutien indéfectible et votre confiance. Vous avez été ma force dans les moments de doute et mon encouragement dans les moments difficiles. Cette réussite vous appartient autant qu'à moi.

À toute ma famille, à mes enseignants, à mes amis(es) et à toutes les personnes qui m'ont soutenue de près ou de loin.

Je dédie ce travail avec une profonde reconnaissance, en mémoire de ceux qui m'ont quittée trop tôt et en hommage à ceux qui ont illuminé mon chemin.

ملخص:

يقارن هذا العمل التجريبي ثلاثة أنواع من الخرسانة: خرسانة مرجعية تحتوي على ركام طبيعي مسحوق، وخرسانة تحتوي على ركام طيني موسع كروي الشكل، وخرسانة تحتوي على ركام طيني ممدد مسحوق. بعد قياس نسب امتصاص الماء للركام، تم تصميم الخلطات الخرسانية باستخدام طريقة درو غوريس.

في الحالة الطرية، تم قياس قابلية التشغيل باستخدام مخروط Abrams، وكذلك كمية الهواء المحبوس في الخرسانة المصنعة. وفي الحالة الصلبة، وفي أعمار 2 و 7 و 14 و 28 يوماً، تم قياس مقاومة الانضغاط على عينات مكعبة بأبعاد $15 \times 15 \times 15$ سم³، ومقاومة الشد على عينات مكعبة بأبعاد $28 \times 7 \times 7$ سم³ (اختبار الانحناء بثلاث نقاط). كما تم تقييم الكثافة الحجمية وفقدان الكتلة.

أظهرت النتائج أن الخرسانة المحتوية على الطين الممدد (الكروي والمسحوق) تتمتع بمقاومة مكافئة أو أعلى من الخرسانة المرجعية، مع كثافة حجمية أقل (بنسبة 20–30%) وفقدان كتلة منخفض.

حقق ركام الطين الممدد المسحوق أفضل أداء، وذلك بسبب التصاقه الأفضل بعجينة الإسمنت. تؤكد هذه النتائج أن الطين الممدد يسمح بتخفيف وزن الخرسانة مع الحفاظ على أدائها الميكانيكي وثباتها الكتلي أو حتى تحسينهما، مما يجعله مادة واعدة للهياكل خفيفة الوزن في المناطق الزلزالية.

الكلمات المفتاحية: طين ممدد، خرسانة خفيفة الوزن، ركام مسحوق، مقاومة الانضغاط، مقاومة الشد، كثافة حجمية، فقدان الكتلة، طريقة درو غوريس، امتصاص الماء.

Abstract:

This experimental work compares three concretes: a control concrete made with crushed natural aggregates, a concrete with nodular expanded clay aggregates (round shape), and a concrete with crushed expanded clay aggregates. After measuring the water absorption rates of the aggregates, the concretes were formulated using the Dreux Gorisse method.

In the fresh state, workability using the Abrams cone and occluded air content were measured on the produced concretes. In the hardened state, at 2, 7, 14, and 28 days, compressive strength was measured on $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$ cube specimens, and tensile strength was measured on $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$ prismatic specimens (three-point bending test). Densities and mass losses were also evaluated. The results show that concretes with expanded clay (both nodular and crushed) exhibit equivalent or higher strengths than the control concrete, with lower densities (20–30% reduction) and reduced mass loss.

Crushed expanded clay gives the best performance, due to better adhesion with the cement paste. These results confirm that expanded clay makes it possible to lighten concrete while maintaining or even improving its mechanical performance and mass stability, making it a promising material for lightweight structures in seismic zones.

Keywords: expanded clay, lightweight concrete, crushed aggregates, compressive strength, tensile strength, density, mass loss, Dreux Gorisse method, water absorption.

Résumé :

Ce travail expérimental compare trois bétons : un témoin à base de granulats naturels concassés, un béton à granulats d'argile expansée nodulaires (forme ronde) et un béton à granulats d'argile expansée concassés. Après mesure des taux d'absorption d'eau des granulats, les bétons ont été formulés par la méthode Dreux-Gorisse.

A l'état frais l'ouvrabilité au cône d'Abrahms et l'air occlus ont été mesurés sur les bétons confectionnés. A l'état durci et à 2, 7, 14 et 28 jours, la résistance à la compression a été mesurée sur des éprouvettes cubes $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$, et la résistance à la traction sur des éprouvettes prismatiques $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$ (essai de flexion par trois points). On a aussi évalué les masses volumiques et les pertes de masse. Les résultats montrent que les bétons à argile expansée (nodulaires et concassés) présentent des résistances équivalentes ou supérieures à celles du témoin, avec des masses volumiques plus faibles (réduction de 20 à 30 %) et des pertes de masse réduites.

L'argile expansée concassée donne les meilleures performances, en raison d'une meilleure adhérence avec la pâte de ciment. Ces résultats confirment que l'argile expansée permet d'alléger le béton tout en maintenant, voire en améliorant, ses performances mécaniques et sa stabilité massique, ce qui en fait un matériau prometteur pour les structures légères en zone sismique.

Mots-clés : argile expansée, béton léger, granulats concassés, résistance à la compression, résistance à la traction, masse volumique, perte de masse, méthode Dreux-Gorisse, absorption d'eau.

Table des matières

Remerciements	i
Dédicace	ii
ملخص	iii
Abstract	iv
Résumé	v
 Introduction générale	1
 Chapitre I : Recherche bibliographique	6
I. Généralités sur les granulats	7
I.1 Définition et rôle	7
I.2 Classification granulaire (norme NF P 18-101)	7
I.3 Origine et types	7
I.3.1 Granulats naturels	7
I.3.2 Granulats artificiels	8
I.3.3 Granulats recyclés	8
I.4 Propriétés physiques et mécaniques des granulats	8
II. Les granulats légers : caractérisations	9
II.1 Définition et normes	9
II.2 Intérêt des granulats légers	9
II.3 Mécanismes physico-chimiques de la légèreté	9
II.4 Classification détaillée	10
II.4.1 Granulats légers naturels	10
II.4.2 Granulats légers artificiels	11
II.4.3 Granulats légers organiques (biosourcés)	12
II.5 Durabilité des granulats légers	13
III. Les bétons légers : typologie et propriétés	14
III.1 Définition et classification fonctionnelle	14
III.2 Principe d'obtention des vides	14

III.3 Propriétés physiques et mécaniques des bétons légers	15
III.3.1 Masse volumique	15
III.3.2 Résistance à la compression	16
III.3.3 Module d'élasticité	17
III.3.4 Résistance en traction	17
III.3.5 Retrait et fluage	18
III.4 Propriétés thermiques des bétons légers	18
III.4.1 Conductivité thermique	18
III.4.2 Chaleur spécifique et diffusivité	18
III.4.3 Comportement au feu	19
III.5 Durabilité des bétons légers	19
III.5.1 Perméabilité et absorption capillaire	19
III.5.2 Résistance au gel-dégel	19
III.5.3 Carbonatation	20
III.5.4 Résistance aux chlorures et aux sulfates	20
IV. Formulation des bétons légers	21
IV.1 Spécificités liées aux granulats légers	21
IV.2 Méthodes de formulation	21
IV.2.1 Méthode des volumes absolus (ACI 211.2)	21
IV.2.2 Méthode de substitution volumique	22
IV.2.3 Méthode du laboratoire expérimental (optimisation)	22
IV.3 Rôle des adjuvants	22
IV.4 Exemple de formulation type pour un béton d'argile expansée structurel	22
V. Cas d'études et applications dans le monde	23
V.1 Ouvrages célèbres utilisant des bétons légers	23
V.2 Retours d'expérience dans le bâtiment	23
V.3 Applications innovantes	24
VI. Normes et réglementations	24
VI.1 Normes européennes (CEN)	24
VI.2 Normes algériennes (RPA, DTR)	25
VI.3 Marquage CE	25
VII. Perspectives de recherche et innovations	25
VII.1 Nouveaux matériaux biosourcés	25
VII.2 Béton léger auto-cicatrisant	26

VII.3 Béton léger à faible empreinte carbone	26
VII.4 Fabrication additive (impression 3D) de béton léger	26
Conclusion du chapitre I	27
Références bibliographiques du chapitre I	28
 Chapitre II : Matériaux & Méthodes expérimentales	30
I. MATERIAUX	30
I.1 Introduction	30
I.2 Matériaux utilisés	30
a. Le ciment	30
b. Granulats	32
c. Eau de gâchage	35
I.3 Formulations adoptées	36
1. Détermination du rapport C/E	36
2. Détermination de C	37
3. Détermination de E	38
4. Détermination du mélange optimal à minimum de vides	38
5. Détermination de la compacité du béton	41
6. Détermination des masses de granulats	43
7. Comparaison des trois formulations	44
I.4 Préparation des éprouvettes	45
I.5 Conclusion	46
II. METHODES EXPERIMENTALES	47
II.1 Introduction	47
II.2 Essais de caractérisation physiques des matériaux	47
II.2.1 Équivalent de sable (NF P18-598)	47
II.2.2 Analyse granulométrique (EN 933-1 et EN 933-2)	48
II.2.3 Module de finesse (NF P18-304)	49
II.2.4 Masse volumique apparente	50
II.2.5 Masse volumique absolue	50
II.2.6 Consistance du ciment (NF EN 196-3)	51
II.2.7 Temps de début de prise d'un ciment (NF EN 196-3)	52

II.2.8 Absorption des granulats (NF EN 1097-6)	53
II.3 Essais de caractérisation des bétons à l'état frais	54
II.3.1 Essai au cône d'Abrams (NF P 18-451)	54
II.3.2 Teneur en air occlus (Norme EN 12350-7)	55
II.4 Essais de caractérisation des bétons à l'état durci	56
II.4.1 Essai de traction par flexion trois points	56
II.4.2 Essai de compression	57
II.5 Conclusion	58
 Chapitre III : Résultats et analyses	59
3.1 Présentation des matériaux étudiés	59
3.2 Propriétés à l'état frais	60
3.2.1 Teneur en air occlus et affaissement	60
3.2.2 Discussion sur l'air occlus et l'ouvrabilité	62
3.3 Pertes de masse (séchage)	63
3.4 Variation des masses volumiques	65
3.5 Résistance à la compression	68
3.6 Résistance à la traction	70
3.7 Absorption d'eau des granulats et du béton	72
3.7.1 Absorption des granulats par classe granulaire	72
3.7.2 Relations entre absorption d'eau et performances mécaniques	74
3.8 Discussion générale et synthèse	75
3.8.1 Synthèse des performances à 28 jours	75
3.8.2 Concordances et divergences avec la littérature	76
3.8.3 Limitations et précautions	76
3.8.4 Originalité de l'étude et perspectives	77
3.9 Conclusion du chapitre III	78
 Conclusion générale	79
 Références bibliographiques	81
 Annexes	(pages annexes)

Liste des tableaux

N°	Titre	Page
Tableau I.1	Classes granulaires des différents types de granulats	22
Tableau I.2	Tableau comparatif des granulats naturels légers	26
Tableau I.3	Tableau des granulats artificiels légers	27
Tableau I.4	Exemple de formulation d'un béton d'argile expansée	38
Tableau II.1	Caractéristique effectuée dans le laboratoire	46
Tableau II.2	Analyse chimique depuis la fiche technique	46
Tableau II.3	Propriétés physiques depuis la fiche technique	47
Tableau II.4	Les désignations, l'apparence et la nature des granulats naturels	47
Tableau II.5	Désignations, apparence et nature des granulats légers d'argile expansée	48
Tableau II.6	Les caractéristiques physiques des granulats lavés obtenues par l'étude expérimentale	48
Tableau II.7	Correspondance entre classe vraie et dénomination normalisée des ciments	51
Tableau II.8	Coefficient granulaire G' en fonction de la qualité et de D_{max}	52
Tableau II.9	Correction sur le dosage de pâte en fonction de D_{max}	54
Tableau II.10	K , fonction de la forme des granulats, du mode de vibration et du dosage en ciment	55
Tableau II.11	Calcul des données de la droite de référence de Dreux Gorisse	55

N°	Titre	Page
Tableau II.12	Compacité du béton en fonction de Dmax, de la consistance et du serrage	58
Tableau II.13	Calcul de la compacité de béton	58
Tableau II.14	Calcul du volume et des quantités des granulats pour 1 m ³ de béton	59
Tableau II.15	Comparaison entre les trois formulations	60
Tableau III.1	Teneur en air occlus et affaissement des trois bétons	76
Tableau III.2	Diminution des masses des bétons (g)	79
Tableau III.3	Évolution des pertes relatives des masses (%)	80
Tableau III.4	Variation des masses volumiques des bétons (g/cm ³)	81
Tableau III.5-a	Résistance à la compression (MPa) – éprouvettes cubiques	85
Tableau III.5-b	Résistance à la compression (MPa) – éprouvettes cylindriques	85
Tableau III.6	Résistance à la traction (MPa)	87

N°	Titre	Page
Tableau III.7	Absorption d'eau des différentes classes granulaires (%)	89
Tableau III.8	Comparaison des résultats de synthèse avec la littérature	92

Liste des figures

N°	Titre	Page
Figure I.1	Variation des masses volumiques en fonction des taux de substitutions en argile expansée (Benamor & Mansri, 2021)	31
Figure I.2	Variation des résistances à la compression en fonction du taux de substitution de l'argile expansée	32
Figure II.1	Analyse granulométrique des granulats légers d'Argile Expansée Concassée	49
Figure II.2	Analyse granulométrique des granulats légers d'Argile Expansée Nodulaire	49
Figure II.3	Granulométrie des sables non corrigés	50
Figure II.4	Abaque permettant la détermination de C_{opt}	53
Figure II.5	Formulation du béton ordinaire témoin	56
Figure II.6	Formulation du béton ordinaire d'argile expansée concassée	56
Figure II.7	Formulation du béton ordinaire d'argile expansée nodulaire	57
Figure II.8	Moules utilisés (cubique 15×15 et prismatique 7×7×28)	60
Figure II.9	Préparation des éprouvettes de béton	61

N°	Titre	Page
Figure II.10	Essai d'équivalent de sable	63
Figure II.11	Analyse granulométrique	64
Figure II.12	Masse volumique apparente	65
Figure II.13	Mesure des masses volumiques absolues à l'éprouvette graduée	66
Figure II.14	Masse volumique du ciment au benzène	66
Figure II.15	Consistance du ciment (appareil Vicat)	67
Figure II.16	Début et fin de prise	68
Figure II.17	Mode opératoire de l'essai d'absorption d'eau par la méthode du chiffon	69
Figure II.18	Essai d'affaissement au cône d'Abrams	70
Figure II.19	Mise en place du béton frais pour mesurer la teneur en air	70
Figure II.20	Résultats de l'essai d'air occlus sur les différents bétons	71

N°	Titre	Page
Figure II.21	Essai de traction par flexion	72
Figure II.22	Essai de compression	73
Figure III.1	Air occlus des différents bétons	77
Figure III.2	Affaissements des différents bétons	78
Figure III.3	Variation des masses des différents bétons	79
Figure III.4	Pertes de masses des différents bétons	80
Figure III.5	Variation des masses volumiques des différents bétons	82
Figure III.6	Variation de la résistance à la compression des bétons BO, BC et BN en fonction de l'âge de cure	86
Figure III.7	Variation des résistances à la traction par flexion	87
Figure III.8	Évolution des résistances à la compression (rapport R_c/R_{c28})	88
Figure III.9	Évolution des résistances à la traction (rapport R_t/R_{t28})	90

N°	Titre	Page
Figure III.10	Cinétique d'absorption d'eau des granulats d'argile expansée nodulaires et concassés	91

Liste des abréviations

Abréviation	Signification
ACI	American Concrete Institute (Institut américain du béton)
BC	Béton à granulats d'argile expansée concassés
BN	Béton à granulats d'argile expansée nodulaires
BO	Béton ordinaire (témoin)
C/E	Rapport ciment sur eau (inverse de E/C)
CEM	Ciment (suivi d'un chiffre pour la classe, ex. CEM II 42.5 N)
CNERIB	Centre National d'Études et de Recherches Intégrées du Bâtiment (Algérie)
Dmax	Diamètre maximal des granulats
DTR	Document Technique Réglementaire (Algérie)
E/C	Rapport eau sur ciment effectif
ECA	Expanded Clay Aggregate (granulat d'argile expansée)
EN	Norme européenne (European Norm)
GICA	Groupe Industriel des Ciments d'Algérie
LECA	Light Expanded Clay Aggregate (argile expansée légère)
LWAC	Lightweight Aggregate Concrete (béton de granulats légers)
MEB	Microscope électronique à balayage
MF	Module de finesse
NF	Norme française
PSE	Polystyrène expansé
RAG	Réaction alcali-granulat
Rc	Résistance à la compression
RPA	Règlement Parasismique Algérien

Abréviation	Signification
Rt	Résistance à la traction
SC	Sable de carrière (utilisé également pour « sable concassé » dans le contexte de l'a expansée)
SM	Sable de mer
SSS	Saturated Surface Dry (état saturé surface sèche)
ULHPC	Ultra-High Performance Lightweight Concrete (béton léger à ultra-haute performance)
ZTI	Zone de transition interfaciale (entre pâte et granulat)

Introduction générale

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé au monde (plus de 10 milliards de tonnes par an). Sa polyvalence, sa résistance mécanique et son coût modéré expliquent cet usage massif. Cependant, le béton conventionnel présente un inconvénient majeur : sa masse volumique élevée (2200-2600 kg/m³). Celle-ci induit des charges permanentes importantes, des sections d'éléments porteurs surdimensionnées et des fondations lourdes. Dans les zones sismiques comme le nord de l'Algérie, la réduction des masses est cruciale car les forces d'inertie sont proportionnelles à la masse.

Par ailleurs, les exigences thermiques actuelles (RT 2012, RE2020) poussent à utiliser des matériaux moins conducteurs que le béton ordinaire (conductivité $\lambda \approx 1,8-2,0$ W/m·K). Une alternative prometteuse consiste à alléger le béton tout en améliorant son isolation grâce à des granulats légers.

Les granulats légers (masse volumique apparente ≤ 1500 kg/m³ selon EN 13055) se distinguent par leur porosité interne, naturelle (pierre ponce, pouzzolane) ou artificielle (argile expansée, schiste expansé, etc.). Parmi eux, l'**argile expansée** (LECA) occupe une place de choix. Obtenue par cuisson d'argile à 1100-1300 °C, elle forme une structure alvéolaire fermée à surface vitrifiée, alliant résistance mécanique et absorption d'eau limitée (5-15 %).

L'argile expansée existe sous deux formes principales :

- **Nodulaire** : billes rondes issues de la granulation avant cuisson.
- **Concassée** : obtenue par broyage des nodules après cuisson, présentant des arêtes vives et une surface spécifique plus élevée.

La forme des particules influence l'adhérence pâte-granat, la compacité du squelette granulaire et les performances mécaniques finales. Alors que de nombreuses études ont porté sur les bétons à argile expansée nodulaire (Kockal & Ozturan, 2011 ; Lo et al., 2004 ; Neville, 2011 ; ACI 213R, 2014), la comparaison systématique entre formes nodulaire et concassée est moins documentée, en particulier dans le contexte des matériaux locaux algériens.

Ce mémoire vise à étudier et comparer trois bétons :

- Un béton témoin (BO) à granulats naturels concassés (unité GICA Mostaganem) ;
- Un béton à granulats d'argile expansée nodulaires (BN) (fournis par ALGEXPAN) ;

- Un béton à granulats d'argile expansée concassés (BC) (fournis par ALGEXPAN) ;

Les trois formulations sont réalisées par la méthode Dreux Gorisse, avec un dosage en ciment constant ($\sim 400 \text{ kg/m}^3$) et un rapport eau/ciment effectif ajusté pour compenser l'absorption des granulats légers. Des superplastifiants assurent une ouvrabilité suffisante (affaissement au cône d'Abrams : 6-8 cm).

Des éprouvettes normalisées sont fabriquées : cubes $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$ pour la compression, prismes $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$ pour la traction par flexion (trois points). Les mesures (masse volumique, perte de masse, résistance à la compression – EN 12390-3, résistance à la traction – EN 12390-6) sont effectuées à 2, 7, 14 et 28 jours.

- On s'attend, d'après la littérature, à une réduction de masse volumique de 20-30 % pour les bétons légers, associée à une meilleure isolation thermique. La forme concassée pourrait offrir de meilleures performances mécaniques grâce à une meilleure adhérence pâte-granat. On cherche à vérifier si à 28 jours ces bétons atteignent des résistances compatibles avec un usage structurel (classe LC20/22 à LC30/33 avec **LC** = Lightweight Concrete (béton léger)).

Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique sur les granulats légers et les bétons légers (définitions, propriétés, durabilité, formulation). **Le second chapitre** décrit le programme expérimental (matériaux, formulation, fabrication des éprouvettes, protocoles). **Le troisième chapitre** expose les résultats (masses volumiques, pertes de masse, résistances) et les discute. **Une conclusion générale** rappelle les principaux enseignements, limites et perspectives (essais de durabilité, conductivité thermique, optimisation, tests sur éléments réels).

L'étude vise à démontrer qu'il est possible de produire en Algérie des bétons légers performants à base de ressources locales, répondant aux exigences sismiques et thermiques.

Chapitre I : Recherche bibliographique

Chapitre I : Recherche bibliographique

Introduction

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé au monde après l'eau. Sa production mondiale annuelle dépasse les 10 milliards de tonnes, ce qui représente environ 2 tonnes par habitant de la planète (Neville, 2011). Cette omniprésence s'explique par sa polyvalence, sa disponibilité, sa résistance mécanique et sa durabilité apparente. Cependant, le béton conventionnel présente un inconvénient majeur : sa masse volumique élevée (environ 2400 kg/m³), qui induit des charges importantes sur les structures et limite ses performances thermiques (Mehta & Monteiro, 2014).

Depuis l'Antiquité, l'homme a cherché à alléger les matériaux de construction. Les Romains utilisaient déjà des pouzzolanes naturelles pour construire des voûtes plus légères (Chandra & Berntsson, 2002). Au XX^e siècle, le développement des granulats légers artificiels (argile expansée, schiste expansé) a ouvert la voie aux bétons légers structuraux (ACI 213R, 2014). Aujourd'hui, face aux défis du changement climatique et de la transition énergétique, les bétons légers connaissent un regain d'intérêt car ils permettent de réduire l'empreinte carbone des bâtiments (moins de matériaux, meilleure isolation, économies d'énergie) (Demirboğa & Gül, 2003).

Ce chapitre a pour objectif de présenter une synthèse bibliographique exhaustive sur les granulats légers et les bétons légers. Il aborde successivement : la classification et les propriétés des granulats, les différents types de granulats légers (naturels, artificiels, organiques), les techniques de fabrication, les performances mécaniques et thermiques, la durabilité, les méthodes de formulation, les applications courantes et les perspectives d'innovation. Une attention particulière est portée à l'argile expansée, qui constitue le matériau d'étude de ce mémoire.

I. Généralités sur les granulats

I.1 Définition et rôle

Les granulats sont des grains minéraux (d'origine naturelle ou artificielle) utilisés dans la composition des bétons, mortiers, chaussées et ballasts (EN 13055, 2016). Ils constituent l'ossature du matériau et représentent 60 à 80 % du volume total d'un béton. Leur fonction est multiple : ils réduisent le retrait, augmentent la stabilité dimensionnelle, améliorent la résistance à l'usure et diminuent le coût du matériau par rapport à la pâte de ciment seule (Neville, 2011). Selon Mehta & Monteiro (2014), la qualité des granulats conditionne directement la durabilité du béton.

I.2 Classification granulaire (norme NF P 18-101)

Le tableau suivant détaille les classes granulaires selon la norme française NF P 18-101 :

Tableau I.1: Classes granulaires des différents types de granulats

Classe	Désignation	Diamètre (mm)	Exemples d'usage
0/0,08	Filler	$\leq 0,08$	Ajout dans les bétons à haute performance
0,08/6,3	Sable	0,08 – 6,3	Mortiers, bétons courants
6,3/31,5	Gravillon	6,3 – 31,5	Béton armé, précontraint
20/80	Caillou	20 – 80	Béton de gros œuvres
0/80	Grave	0 – 80	Couches de chaussée

La courbe granulométrique (analyse par tamisage) permet de déterminer le module de finesse et la compacité du squelette granulaire. Un bon enchevêtrement des grains (granulats étalés) réduit la porosité interstitielle et améliore la résistance (EN 206, 2021).

I.3 Origine et types

I.3.1 Granulats naturels

Ils proviennent de roches meubles (alluvions, dunes) ou massives (calcaires, grès, basaltes). Ils subissent des traitements mécaniques : concassage, criblage, lavage. Leurs propriétés varient selon la pétrographie (Neville, 2011). Par exemple :

- **Calcaire** : densité 2,6 – 2,8, résistance à la compression modérée (80-150 MPa), sensible aux acides.
- **Granite** : densité 2,6 – 2,7, résistance élevée (150-250 MPa), bonne durabilité.
- **Basalte** : densité 2,8 – 3,0, résistance très élevée (>250 MPa), mais lourd.

I.3.2 Granulats artificiels

Ils sont produits par transformation thermique (cuisson) de matières premières : argile, schiste, laitier, cendres volantes. Le traitement à haute température (800-1200 °C) provoque une expansion gazeuse qui crée une porosité interne fermée (Chandra & Berntsson, 2002). Exemples : LECA (argile expansée), laitier expansé, perlite expansée.

I.3.3 Granulats recyclés

Issus du concassage de déchets de construction (béton, briques, tuiles). Leur utilisation réduit l'exploitation de carrières et valorise les déchets (EN 13055, 2016). Leurs propriétés sont souvent inférieures (absorption plus élevée, résistance moindre) mais des traitements (séchage, dépoussiérage, enrobage) permettent de les améliorer (Mehta & Monteiro, 2014).

I.4 Propriétés physiques et mécaniques des granulats

Les principales caractéristiques à connaître sont (Neville, 2011 ; ACI 213R, 2014) :

- **Masse volumique absolue (ρ_a)** : masse d'un volume unité de matière pleine (sans vide), mesurée au pycnomètre.
- **Masse volumique apparente (ρ_{ap})** : masse des grains par unité de volume incluant les pores internes.
- **Porosité** : rapport du volume des pores au volume total. Pour les granulats légers, la porosité peut atteindre 80 %.
- **Absorption d'eau** : capacité de retenir l'eau par capillarité. Exprimée en pourcentage de la masse sèche. Les granulats légers absorbent de 10 à 50 % d'eau, contre 1 à 2 % pour les granulats normaux.
- **Résistance à l'écrasement** : mesurée par l'essai Los Angeles (L.A.) ou l'essai Deval. Pour les granulats légers, la valeur L.A. est souvent > 30 % (limite pour béton structurel : < 40 %).

- **Résistance au gel** : déterminée par l'essai de gel-dégel (EN 1367-1). Les granulats légers à pores fermés sont généralement résistants.

II. Les granulats légers : caractérisations

II.1 Définition et normes

Selon la norme **EN 13055: 2016** (Granulats légers pour béton, mortier et coulis), un granulat est qualifié de léger si sa masse volumique apparente en vrac $\leq 1200 \text{ kg/m}^3$ ou sa masse volumique réelle des grains $\leq 2000 \text{ kg/m}^3$. Cette norme distingue trois types : naturels, fabriqués et recyclés. Elle fixe également des exigences de résistance mécanique, d'absorption et de stabilité chimique (EN 13055, 2016).

II.2 Intérêt des granulats légers

- **Réduction du poids propre** des structures (jusqu'à -30 à -40 %). Allègement des fondations, possibilité de constructions plus hautes avec des sections réduites (ACI 213R, 2014).
- **Amélioration de l'isolation thermique** (conductivité λ divisée par 3 à 5). Contribution à la réglementation thermique (RT 2020, RE2020) (Kockal & Ozturan, 2011).
- **Comportement sismique** : la réduction des masses diminue les forces d'inertie (loi fondamentale : $F = m \times a$). Un bâtiment en béton léger subit des accélérations sismiques moindres (Hamzaoui, 2022 ; RPA, 2024).
- **Acoustique** : la porosité absorbe les ondes sonores, améliorant l'isolation phonique (Chandra & Berntsson, 2002).
- **Durabilité** : certains granulats légers (argile expansée) sont très résistants à l'eau et aux cycles de gel (Babu & Babu, 2003).

II.3 Mécanismes physico-chimiques de la légèreté

La légèreté provient de la présence de vides (pores) à l'intérieur des grains. Ces pores peuvent être (Mehta & Monteiro, 2014) :

- **Fermés** : non connectés entre eux, ils n'absorbent pas l'eau et assurent une meilleure résistance.

- **Ouverts** : communicants, ils augmentent l'absorption d'eau et réduisent la résistance.

Lors de la fabrication des granulats expansés, la matière première (argile, schiste, perlite) est chauffée rapidement. Les silicates fondent en surface formant une coque vitreuse, tandis que les gaz produits par déshydroxylation (vapeur d'eau, CO₂, O₂) se dilatent à l'intérieur, créant une structure alvéolaire. Le refroidissement rapide fige cette structure (Chandra & Berntsson, 2002).

II.4 Classification détaillée

II.4.1 Granulats légers naturels

Pouzzolane : Roche volcanique de couleur rouge ou noire, poreuse. Masses volumiques 700-900 kg/m³. Elle possède des propriétés pouzzolaniques (réagit avec la chaux pour former des silicates de calcium hydratés). Utilisée historiquement par les Romains. Aujourd'hui, elle sert dans les bétons légers non structurels et les mortiers (Neville, 2011).

Pierre ponce : Roche volcanique plus légère (500-900 kg/m³) avec des alvéoles souvent parallèles. Sa faible densité en fait un excellent isolant. Utilisée dans les blocs de maçonnerie, les chapes (Kılıç et al., 2012).

Perlite : Roche siliceuse d'origine volcanique qui, chauffée à 900-1100 °C, se dilate jusqu'à 20 fois son volume. Masse volumique descend à 120-190 kg/m³. La perlite expansée est blanche, légère, très absorbante. Utilisée dans les enduits isolants, les bétons réfractaires (Demirboğa & Gül, 2003).

Vermiculite : Minéral micacé (phyllosilicate) qui, sous l'effet de la chaleur, se dilate comme un accordéon. Masse volumique 50-125 kg/m³. Elle résiste à des températures jusqu'à 1200 °C. Utilisée en protection incendie, isolation par soufflage (Barnat-Hunek et al., 2018).

Diatomite (ou terre d'infusoires) : Roche sédimentaire composée de squelettes siliceux de diatomées. Très poreuse (masse 200-500 kg/m³). Utilisée comme adjuvant dans les bétons légers, mais surtout comme absorbant (Chabannes et al., 2014).

Tuf volcanique : Roche consolidée de cendres volcaniques. Masse 600-1000 kg/m³. Utilisée en régions volcaniques (Italie, Turquie, Indonésie) pour les blocs porteurs légers (Topçu & Uygunoğlu, 2010).

Le tableau suivant présente une comparaison entre les caractéristiques de physico-mécaniques des granulats naturels légers.

Tableau I.2 : Tableau comparatif des granulats naturels légers (Mehta & Monteiro, 2014)

Type	Densité (kg/m ³)	Porosité (%)	Résistance à l'écrasement (MPa)	Conductivité λ (W/m·K)	Absorption d'eau (%)
Pouzzolane	700-900	40-60	3-8	0,15-0,30	20-30
Ponce	500-800	50-70	2-5	0,10-0,25	25-40
Perlite	120-190	85-95	<1	0,05-0,08	100-200
Vermiculite	50-125	90-98	<0,5	0,05-0,07	150-300
Diatomite	200-500	70-85	1-3	0,06-0,12	80-150

II.4.2 Granulats légers artificiels

Ce sont les plus importants industriellement. Leur production est maîtrisée, ce qui garantit des propriétés constantes (ACI 213R, 2014).

Argile expansée (LECA) : L'argile naturelle est mélangée à de l'eau, granulée, puis cuite dans un four rotatif à 1100-1300 °C. Les gaz dégagés créent des alvéoles fermées. La surface se vitrifie. L'argile expansée se présente sous forme de billes de 2 à 20 mm. Densité 300-800 kg/m³. Résistance à l'écrasement d'une bille : 2-8 MPa. Faible absorption (5-15 %). L'argile expansée est le granulat léger le plus utilisé dans les bétons structuraux (Kockal & Ozturan, 2011 ; Lo et al., 2004).

Schiste expansé : Principe similaire à l'argile expansée, mais à partir de schiste bitumineux ou carboné. Densité légèrement plus élevée (700-1200 kg/m³), meilleure résistance (5-12 MPa). Utilisé dans les ouvrages d'art (ACI 213R, 2014).

Laitier expansé : Sous-produit de la sidérurgie (laitier de haut-fourneau) refroidi rapidement par de l'eau (granulation) ou par un procédé mousse. Densité 600-900 kg/m³. Il possède une composition chimique proche du ciment (hydraulicité latente). Utilisé en béton léger depuis les années 1950. Attention : risque de gonflement si le laitier n'est pas stabilisé (Neville, 2011).

Cendres volantes frittées : Les cendres volantes de centrales thermiques sont agglomérées et frittées à 1100-1200 °C pour former des granulats légers (type Lytag). Densité 800-1100 kg/m³, résistance 10-15 MPa (Mehta & Monteiro, 2014).

Verre expansé : Le verre recyclé est broyé, mélangé à un agent d'expansion (carbone) et chauffé. Le verre ramolli et le gaz forme des alvéoles. Densité 150-300 kg/m³, très bonne isolation, imputrescible. Utilisé en remblai léger et en bétons décoratifs (Chandra & Berntsson, 2002).

Polystyrène expansé (PSE) : Billes de polystyrène pré-expansées à la vapeur. Densité extrêmement faible (10-30 kg/m³). Résistance mécanique très faible. Utilisé dans les bétons d'allègement non structurels. Le PSE est un isolant thermique exceptionnel ($\lambda=0,03-0,04$ W/m·K) (Babu & Babu, 2003).

Tableau I.3 : Tableau des granulats artificiels légers [Chen, B., & Liu, J. (2018)]

Type	Densité (kg/m ³)	Résistance écrasement (MPa)	Absorption eau (%)	Conductivité λ (W/m·K)	Coût relatif
Argile expansée	300-800	2-8	5-15	0,10-0,20	2-3
Schiste expansé	700-1200	5-12	8-20	0,15-0,30	2-4
Laitier expansé	600-900	3-10	10-25	0,15-0,25	1-2
Cendres frittées	800-1100	10-20	10-30	0,20-0,35	2-3
Verre expansé	150-300	0,5-2	2-10	0,07-0,12	4-6
PSE*	10-30	0,1-0,5	<1	0,03-0,04	3-5

(*) : Polystyrène Expansé

II.4.3 Granulats légers organiques (biosourcés)

Fibres de bois, copeaux, sciure : La sciure de bois est souvent utilisée dans les bétons légers depuis le début du XXe siècle. Densité 150-400 kg/m³. L'inconvénient majeur est l'absorption d'eau (jusqu'à 200 %), la sensibilité biologique (champignons, termites) et l'alcali-réaction avec le ciment. Des traitements (étuvage, enrobage) sont nécessaires (Chabannes et al., 2014).

Chanvre : Le béton de chanvre (mélange de chènevotte – partie ligneuse de la tige de chanvre – et de liant à base de chaux) est devenu populaire pour l'isolation écologique. Densité 200-600 kg/m³, résistance 0,3-2 MPa, conductivité $\lambda=0,06-0,12$ W/m·K. Il ne supporte pas les

charges structurelles mais offre une excellente régulation hygrothermique (Elfordy et al., 2008 ; Arnaud & Gourlay, 2012).

Liège expansé : Granulés de liège (écorce de chêne-liège) chauffés à la vapeur, ils se dilatent et se lient entre eux sans additif. Densité 100-200 kg/m³. Le liège est imputrescible, élastique. Utilisé dans les chapes isolantes et les bétons légers pour l'acoustique (Walker, 1999).

Balles de riz : Sous-produit agricole très abondant en Asie. Les balles de riz carbonisées ou non peuvent servir de granulats légers. Densité 100-150 kg/m³. Elles sont très siliceuses ; mélangées à la chaux, elles produisent une réaction pouzzolanique. Peu utilisées en Europe (Mehta & Monteiro, 2014). Les avantages et inconvénients des granulats organiques sont cités ci-dessous.

Avantages

Faible impact carbone (stockage de CO₂)

Renouvelables

Excellente isolation thermique

Bon confort hygrothermique

Inconvénients

Faible résistance mécanique

Forte absorption d'eau

Sensibilité aux micro-organismes

Vieillesse possible

II.5 Durabilité des granulats légers

La durabilité désigne l'aptitude d'un matériau à résister aux actions physiques, chimiques et biologiques dans le temps (Neville, 2011). Pour les granulats légers, les principaux phénomènes sont :

- **Gel-dégel** : l'eau contenue dans les pores gèle et se dilate (environ 9 %). Si les pores sont saturés, la pression de glace peut rompre le granulat. Les granulats à pores fermés résistent mieux. Les granulats naturels très poreux (perlite, vermiculite) sont vulnérables. Les argiles expansées, grâce à leur coque vitreuse, sont généralement résistantes (facteur de résistance au gel > 95 % selon EN 1367-1) (Babu & Babu, 2003).
- **Carbonatation** : le CO₂ de l'air pénètre dans le béton et réagit avec la portlandite (Ca(OH)₂) pour former du calcaire. Ce phénomène réduit le pH et peut dépassiver les armatures. Dans les bétons légers, la porosité élevée accélère la carbonatation (EN 1992-1-1, 2004).

- **Attaques chimiques** (sulfates, acides, eau de mer) : les granulats légers argileux sont généralement inertes. Les granulats calcaires (pouzzolane calcaire) sont sensibles aux acides (Mehta & Monteiro, 2014).
- **Réaction alcali-granulat (RAG)** : certains granulats siliceux (opale, chert, roches volcaniques) réagissent avec les alcalins du ciment pour former un gel expansif qui fissure le béton. Les argiles expansées sont peu réactives (silice amorphe faible) (Neville, 2011).
- **Feu** : les granulats légers sont souvent plus résistants au feu que les granulats ordinaires. Leur porosité ralentit la propagation de la chaleur. Les bétons d'argile expansée gardent 60 à 80 % de leur résistance après exposition à 600 °C, alors que les bétons ordinaires peuvent se désagréger par décarbonatation (ACI 213R, 2014).

III. Les bétons légers : typologie et propriétés

III.1 Définition et classification fonctionnelle

Un béton léger est un béton dont la masse volumique sèche est comprise entre 800 et 2000 kg/m³ (EN 206, 2021). Cette réduction par rapport au béton ordinaire (2200-2600 kg/m³) est obtenue par l'utilisation de granulats légers, par l'incorporation de vides (béton cellulaire, mousse) ou par l'absence de sable (béton caverneux) (Neville, 2011).

On distingue trois classes d'usage (ACI 213R, 2014) :

- **Béton léger isolant** : masse volumique < 1200 kg/m³, résistance à la compression 2-10 MPa, utilisé en remplissage, isolation de toitures, cloisons.
- **Béton léger structurel** : masse volumique 1200-2000 kg/m³, résistance 15-50 MPa, utilisé pour les éléments porteurs (poutres, poteaux, planchers, voiles).
- **Béton ultra-léger** : masse < 800 kg/m³, résistance < 2 MPa, réservé à l'isolation et au non-porteur.

III.2 Principe d'obtention des vides

Trois méthodes principales sont utilisées pour créer les vides responsables de la légèreté (Chandra & Berntsson, 2002) :

1. **Vides intra-granulats** : on remplace les granulats ordinaires par des granulats légers (argile expansée, laitier, etc.). C'est la méthode la plus courante pour les bétons structurels.

2. **Vides inter-granulats** : on supprime le sable (béton caverneux) ou on réduit la quantité de fines pour créer une porosité ouverte entre les gros granulats. La pâte de ciment enrobe les granulats sans combler les interstices.

3. **Vides dans la pâte** : on introduit des bulles d'air (béton cellulaire, béton mousse) par des agents moussants ou par réaction chimique (aluminium). La porosité est répartie dans toute la matrice.

III.3 Propriétés physiques et mécaniques des bétons légers

III.3.1 Masse volumique

La masse volumique du béton léger dépend de celle des granulats, de leur proportion, de la teneur en eau et de la compacité. On peut modéliser la masse volumique du béton durci sec (ρ_b) par la loi des mélanges (Neville, 2011) :

$$\rho_b = \alpha \cdot \rho_{gl} + (1-\alpha) \cdot \rho_p \quad (1)$$

Où (α) est la fraction volumique de granulats légers, (ρ_{gl}) leur masse volumique apparente, et (ρ_p) celle de la pâte de ciment durcie (environ 2000 kg/m³ pour une pâte non poreuse, mais plus faible en présence d'air entraîné).

Exemple : pour un béton contenant 50 % d'argile expansée de $\rho_{gl} = 700$ kg/m³ et 50 % de pâte, $\rho_b = 0,5 \times 700 + 0,5 \times 2000 = 1350$ kg/m³ (Kockal & Ozturan, 2011).

La figure suivante présente la variation des masses volumiques en fonction des taux de substitutions des granulats expansés.

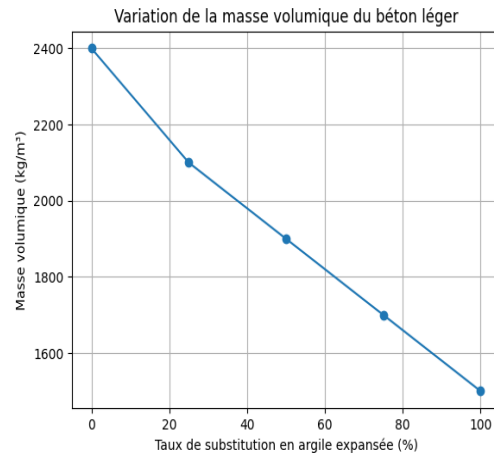


Figure I.1 : Variation des masses volumiques en fonction des taux de substitutions en argile expansée (Benamor & Mansri, 2021)

La figure montre clairement que la masse volumique des bétons décroît lorsque le taux de granulats augmente.

III.3.2 Résistance à la compression

La résistance à la compression (f_c) des bétons légers structuraux est généralement inférieure à celle des bétons ordinaires à dosage de ciment équivalent. Plusieurs modèles ont été proposés. La formule de Hoff (1972) pour les bétons d'argile expansée (cité par ACI 213R, 2014) :

$$f_c = k \cdot (\rho_b / 2400)^2 \cdot f_{c,ref} \quad (2)$$

Avec k un coefficient dépendant du type de granulat (0,8 à 1,2). Plus précisément, pour les bétons légers courants, la relation suivante est souvent utilisée (Neville, 2011) :

$$f_c \text{ (MPa)} \approx 0,03 \cdot \rho_b \text{ (kg/m}^3\text{)} - 25 \quad (3)$$

(Cette formule empirique donne pour $\rho_b=1800 \rightarrow f_c \approx 29$ MPa ; pour $\rho_b=1400 \rightarrow f_c \approx 17$ MPa).

La rupture des bétons légers se produit généralement par écrasement des granulats, et non par fissuration de la pâte comme dans les bétons ordinaires. La zone de transition interfaciale (ZTI) est souvent plus dense et plus résistante du fait de la cure interne apportée par les granulats poreux (Lo et al., 2004).

La figure suivante montre un exemple de la variation des résistances à la compression d'un béton léger en fonction du temps :

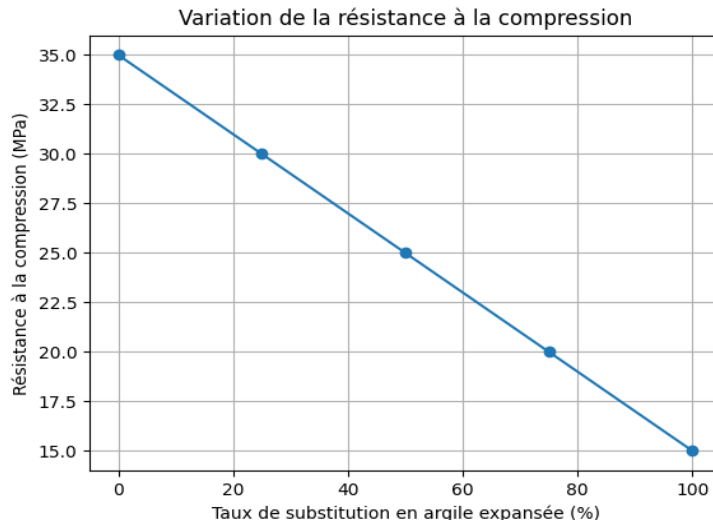


Figure I.2 : variation des résistances à la compression en fonction du taux de substitution de l'argile expansée

III.3.3 Module d'élasticité

Le module d'élasticité statique des bétons légers est plus faible que celui des bétons normaux. L'Eurocode 2 (EN 1992-1-1, 2004) propose la relation suivante :

$$E_{cm} = 22 \cdot (f_{cm} / 10)^{0,3} \cdot (\rho_b / 2400)^{1,5} \quad (4)$$

Où

f_{cm} est la résistance moyenne à la compression en MPa.

ρ_b : Masse volumique du béton.

Pour un béton normal ($\rho_b=2400$), on retrouve : $E_{cm} \approx 22 \cdot (f_{cm}/10)^{0,3} \quad (2)$

Pour un béton léger de même résistance mais de densité 1600 kg/m^3 , E_{cm} sera réduit d'un facteur $(1600/2400)^{1,5} = 0,44$.

Par exemple, si $f_{cm}=30 \text{ MPa}$, E_{cm} normal $\approx 34 \text{ GPa}$, léger $\approx 15 \text{ GPa}$ (Neville, 2011).

Cette flexibilité peut être avantageuse en zone sismique car elle permet une plus grande dissipation d'énergie (Hamzaoui, 2022).

III.3.4 Résistance en traction

La résistance en traction par fendage ($f_{ct,sp}$) est environ 0,7 à 0,8 fois celle d'un béton normal à résistance équivalente. L'Eurocode 2 propose : $f_{ctm} = 0,3 \cdot f_{cm}^{(2/3)} \cdot (\rho_b/2400)^{0,8}$ (EN 1992-1-1, 2004). La résistance en traction directe est encore plus faible. Cette propriété nécessite une attention particulière dans les zones tendues (ACI 213R, 2014).

III.3.5 Retrait et fluage

Le retrait des bétons légers est généralement plus élevé que celui des bétons ordinaires en raison de la plus grande déformabilité des granulats et de l'évaporation de l'eau contenue dans les pores. Les valeurs typiques de retrait final varient de 500 à 800 $\mu\text{m/m}$ (contre 400 à 600 $\mu\text{m/m}$ pour un béton normal). Le fluage est également accru (facteur 1,2 à 1,5) (Neville, 2011 ; Mehta & Monteiro, 2014).

III.4 Propriétés thermiques des bétons légers

III.4.1 Conductivité thermique

La conductivité thermique (λ) d'un béton léger dépend principalement de sa masse volumique et du type de granulat. Plusieurs modèles existent. Une relation simple utilisée dans la réglementation thermique française (RT 2012) (d'après Kockal & Ozturan, 2011) :

$$\lambda = 0,073 \cdot \ln(\rho) - 0,38 \text{ (pour } \rho \text{ en kg/m}^3, \lambda \text{ en W/m}\cdot\text{K)} \quad (5)$$

Exemple : $\rho=1800 \rightarrow \lambda \approx 0,073 \cdot \ln(1800) - 0,38 = 0,073 \cdot 7,495 - 0,38 = 0,547 - 0,38 = 0,167$ W/m·K (très faible). En réalité, pour les bétons d'argile expansée, λ varie entre 0,20 et 0,60 W/m·K selon la densité (Lo et al., 2004).

La norme EN 1745 donne des valeurs tabulées pour les bétons légers de structure : pour $\rho=1400 \text{ kg/m}^3$, $\lambda=0,35 \text{ W/m}\cdot\text{K}$; $\rho=1600$, $\lambda=0,45$; $\rho=1800$, $\lambda=0,60$.

L'amélioration de l'isolation thermique par rapport à un béton ordinaire ($\lambda \approx 2,0$) est spectaculaire : gain de 70 à 85 %. Cela permet de réduire l'épaisseur des murs ou d'atteindre des niveaux de performance énergétique élevés sans surcoût d'isolant rapporté (Chandra & Berntsson, 2002).

III.4.2 Chaleur spécifique et diffusivité

La chaleur spécifique (c_p) des bétons légers est voisine de celle des bétons ordinaires (environ 900 J/kg·K) car la composition minérale est similaire. Cependant, la masse volumique plus faible réduit la capacité calorifique volumique ($\rho \cdot c_p$). La diffusivité thermique ($\alpha = \lambda / (\rho \cdot c_p)$) est généralement plus élevée car λ diminue moins vite que ρ . Cela signifie que le béton léger réagit plus rapidement aux variations de température extérieure (moins d'inertie). Pour les bâtiments, on préfère une forte inertie en été ; l'utilisation de bétons légers doit donc être compensée par une masse importante ou couplée à des matériaux à forte capacité calorifique (Neville, 2011).

III.4.3 Comportement au feu

Les bétons légers résistent mieux au feu que les bétons ordinaires. La porosité diminue la conductivité thermique, ce qui ralentit la montée en température dans les sections. De plus, l'argile expansée et la perlite sont incombustibles. Les bétons légers structuraux peuvent atteindre une résistance au feu de 3 à 6 heures (classification REI 120 à REI 360), contre 2 heures pour un béton ordinaire de même épaisseur. Le polystyrène expansé, en revanche, brûle en dégageant des fumées toxiques ; son usage est interdit dans les structures exposées au feu (ACI 213R, 2014).

III.5 Durabilité des bétons légers

III.5.1 Perméabilité et absorption capillaire

La porosité des bétons légers les rend plus perméables à l'eau et aux gaz. L'absorption d'eau par capillarité peut être 2 à 5 fois plus élevée que celle d'un béton ordinaire. Cela peut entraîner des problèmes de corrosion des armatures, de gel-dégel (si l'eau pénètre), et de carbonatation accélérée (Neville, 2011).

Des solutions existent : utilisation d'adjuvants hydrofuges, traitement de surface (silane, résine), augmentation de l'épaisseur d'enrobage, ou emploi d'un revêtement d'étanchéité (Mehta & Monteiro, 2014).

III.5.2 Résistance au gel-dégel

Les bétons légers à base d'argile expansée montrent une bonne résistance au gel si l'on prend soin de ne pas les saturer d'eau. La porosité fermée des granulats agit comme des réservoirs d'expansion. Les essais normalisés (EN 13369) confirment que les bétons d'argile expansée

peuvent résister à plus de 300 cycles de gel-dégel sans perte de masse significative (Babu & Babu, 2003).

Les bétons très poreux (vermiculite, perlite) sont moins résistants (Chandra & Berntsson, 2002).

III.5.3 Carbonatation

La vitesse de carbonatation (progressant à partir de la surface) est proportionnelle à la racine carrée du temps. Pour les bétons légers, le coefficient de carbonatation peut être 2 à 4 fois supérieur à celui des bétons ordinaires. Ainsi, pour une durée de vie de 50 ans, l'épaisseur d'enrobage nécessaire peut passer de 20 mm à 40-50 mm (EN 1992-1-1, 2004). Les normes EN 1992-1-1 prennent en compte ces différences par des classes d'exposition spécifiques (XC pour carbonatation).

III.5.4 Résistance aux chlorures et aux sulfates

Les bétons légers sont généralement aussi résistants que les bétons ordinaires aux sulfates, si le ciment est adapté (CEM III, CEM V). Pour les chlorures (environnement marin), la perméabilité plus élevée nécessite une protection renforcée (armatures galvanisées ou inox, inhibiteurs de corrosion) (Neville, 2011 ; Mehta & Monteiro, 2014).

IV. Formulation des bétons légers

IV.1 Spécificités liées aux granulats légers

La formulation d'un béton léger diffère de celle d'un béton ordinaire sur plusieurs points (ACI 211.2, 2017) :

- **Absorption d'eau** : les granulats légers absorbent une fraction importante de l'eau de gâchage. Il faut donc prendre en compte cette absorption pour maintenir un rapport eau/ciment effectif constant. On peut pré-humidifier les granulats (saturation) ou ajouter de l'eau supplémentaire.
- **Pré-humidification** : elle consiste à tremper les granulats légers dans l'eau pendant 24 heures jusqu'à saturation. Cela empêche qu'ils ne pompent l'eau de la pâte, mais alourdit le béton frais. Une alternative est d'utiliser une eau de gâchage majorée de l'absorption à 30 minutes (méthode dite « correction d'absorption ») (Neville, 2011).

- **Ouvrabilité** : les granulats légers, souvent anguleux ou de forme irrégulière, augmentent le frottement interne. L'étalement au cône d'Abrams est généralement inférieur à celui d'un béton ordinaire à composition équivalente. L'utilisation de superplastifiants (polycarboxylates) est nécessaire pour atteindre une consistance plastique ou fluide (Kockal & Ozturan, 2011).
- **Ségrégation** : en raison de la faible densité des granulats légers, ils ont tendance à remonter dans le mélange (ségrégation). Il faut éviter une vibration excessive et augmenter la viscosité de la pâte (ajout de fumée de silice, de bentonite, ou d'adjuvants viscosants) (ACI 213R, 2014).

IV.2 Méthodes de formulation

IV.2.1 Méthode des volumes absolus (ACI 211.2)

Cette méthode consiste à fixer la masse volumique cible du béton léger, puis à déterminer les volumes absolus des constituants (ACI 211.2, 2017). Les étapes sont :

1. Choisir la masse volumique sèche cible ($\rho_{b, \text{cible}}$).
2. Déterminer la masse volumique des granulats légers à l'état saturé surface sèche (SSS).
3. Calculer le volume absolu des granulats légers nécessaire pour atteindre la densité.
4. Déterminer le dosage en ciment (C) en fonction de la résistance souhaitée (loi de Bolomey adaptée).
5. Calculer l'eau totale = eau d'absorption + eau de gâchage effective (E/C effectif).
6. Ajuster par essais.

La formule de Bolomey pour les bétons légers est souvent modifiée (Neville, 2011) :

$$f_c = k \cdot (C / (E + E_{\text{abs}}) - 0,5) \quad (6)$$

avec k variant de 15 à 25 selon le type de granulat.

Un exemple numérique complet est présenté en annexe de ce chapitre.

IV.2.2 Méthode de substitution volumique

Elle consiste à remplacer un certain volume de granulats ordinaires par des granulats légers, à volume égal. Cette méthode est simple mais ne permet pas d'optimiser la compacité. Elle est utilisée dans les études paramétriques (Chandra & Berntsson, 2002).

Exemple : substituer 30 % du volume de gravier par de l'argile expansée. La masse volumique du béton décroît linéairement avec le taux de substitution.

IV.2.3 Méthode du laboratoire expérimental (optimisation)

On prépare plusieurs mélanges avec des dosages variables en ciment, eau, granulats légers et adjuvants. On mesure la masse volumique, l'affaissement, la résistance à la compression et la conductivité thermique. Les courbes de réponse permettent de trouver le compromis optimal. C'est la méthode la plus fiable (Kockal & Ozturan, 2011).

IV.3 Rôle des adjuvants

- **Superplastifiants** (naphtalène, polycarboxylate) : indispensables pour obtenir une ouvrabilité correcte avec un faible E/C. Dosage typique 0,5-2 % de la masse de ciment (Neville, 2011).
- **Entraîneurs d'air** : créent des bulles dans la pâte, réduisant la masse volumique (mais aussi la résistance). Utilisés pour les bétons non structuraux (ACI 213R, 2014).
- **Hydrofuges** (stéarates, silanes) : diminuent l'absorption capillaire, améliorent la durabilité (Mehta & Monteiro, 2014).
- **Fumée de silice** : augmente la compacité de la pâte, améliore l'adhérence granulats-pâte et la résistance (Lo et al., 2004).

IV.4 Exemple de formulation type pour un béton d'argile expansée structural (classe LC25/28)

Dans ce qui suit, un exemple de formulation d'un béton à base d'argile expansée avec des paramètres fixés au départ :

Objectifs : masse volumique sèche 1700 kg/m³, résistance 25 MPa à 28 jours (d'après Kockal & Ozturan, 2011).

Tableau I .4 : Exemple de formulation d'un béton d'argile expansée (d'après Kockal & Ozturan, 2011).

Constituant	Valeur	Remarque
Ciment CEM I 42,5 R	400 kg/m ³	
Argile expansée 4/12 mm	650 kg/m ³ (volume absolu 0,45 m ³)	Densité apparente 500 kg/m ³
Sable léger (ou sable normal 0/4)	250 kg/m ³ (sable normal) ou 150 kg/m ³ sable léger	
Eau totale	220 l (dont 50 l absorbés)	E/C effectif = 170/400 = 0,425
Superplastifiant	4 l (1 % ciment)	
Masse volumique fraîche	≈1850 kg/m ³	
Masse volumique sèche	≈1700 kg/m ³	

Après cure, résistance moyenne obtenue 28 MPa, module d'élasticité 18 GPa, $\lambda \approx 0,4$ W/m·K (Kockal & Ozturan, 2011 ; Lo et al., 2004).

V. Cas d'études et applications dans le monde

V.1 Ouvrages célèbres utilisant des bétons légers

- **CN Tower (Toronto, Canada)** : La plus haute tour autoportante du monde (553 m) utilise des bétons légers à base d'argile expansée dans ses niveaux supérieurs pour réduire le poids sur les fondations (ACI 213R, 2014).
- **Pont de Normandie (France)** : Le tablier du pont à haubans utilise un béton léger d'argile expansée afin de réduire les charges suspendues (Chandra & Berntsson, 2002).

- **Mosquée Hassan II (Casablanca, Maroc) :** Les éléments de voûte et les coupoles intègrent des bétons de perlite pour l'isolation thermique (Demirboğa & Gül, 2003).
- **Post Tower (Bonn, Allemagne) :** Un des premiers gratte-ciel en béton léger structurel (jusqu'à 27 étages) avec réduction de poids de 25 % (Neville, 2011).
- **Ouvrages militaires :** Les navires de guerre utilisent des bétons légers pour les superstructures (allègement et insubmersibilité) (Mehta & Monteiro, 2014).

V.2 Retours d'expérience dans le bâtiment

De nombreux promoteurs en France, Allemagne, Suède et Suisse construisent des immeubles résidentiels avec des voiles porteurs en béton d'argile expansée. Les retours montrent (Hamzaoui, 2022 ; Bendjema, 2021) :

- Réduction des coûts de fondation (moins de pieux).
- Gain de confort thermique (moins de ponts thermiques).
- Facilité de mise en œuvre (découpe facile, clouage possible).
- Durée de vie comparable aux bétons normaux (plus de 50 ans sans dégradation majeure).
- Nécessité d'un suivi renforcé de l'étanchéité des façades.

V.3 Applications innovantes

- **Béton léger précontraint :** Permet des portées plus longues pour les poutres de plancher (jusqu'à 20 m avec une hauteur réduite) (ACI 213R, 2014).
- **Béton à ultra-haute performance légers (ULHPC) :** En combinant des fibres d'acier, de la fumée de silice et des granulats légers très résistants (densité 1900 kg/m³, résistance 120 MPa) (Lo et al., 2004).
- **Béton mousse imprimé 3D :** Utilisé pour la construction additive d'habitats légers, isolants et à faible coût (Kockal & Ozturan, 2011).
- **Bétons écologiques à base de déchets :** Mâchefer, cendres volantes, verre expansé, plastique recyclé – économie circulaire (Chabannes et al., 2014).

VI. Normes et réglementations

VI.1 Normes européennes (CEN)

- **EN 13055:2016** : Granulats légers pour béton, mortier et coulis. Définition, exigences, marquage CE.
- **EN 206:2013+A2:2021** : Béton – Spécification, performance, production et conformité. Inclut des annexes spécifiques pour les bétons légers (classes de masse volumique, résistance).
- **EN 1992-1-1:2004** (Eurocode 2) : Calcul des structures en béton. Chapitre 11 dédié aux bétons légers (facteurs de réduction du module, résistance, fluage).
- **EN 1745** : Maçonnerie – Méthode de calcul de la conductivité thermique. Donne des valeurs tabulées pour les bétons légers.
- **EN 13369** : Règles générales pour les produits préfabriqués en béton. Spécifie les essais de durabilité des bétons légers.

VI.2 Normes algériennes (RPA, DTR)

- **Règlement Parasismique Algérien (RPA 2024)** : Le coefficient de comportement pour les structures en béton léger peut être adapté (article 4.2.3). La réduction des masses est prise en compte favorablement (Hamzaoui, 2022).
- **DTR Bâtiment** : Document technique réglementaire C.2.47 (bétons légers) – guide de formulation (CNERIB, 2018).

VI.3 Marquage CE

Depuis 2006, les granulats légers destinés au marché européen doivent porter le marquage CE attestant de leur conformité à la norme EN 13055. Cela inclut la déclaration des performances : densité, résistance, absorption, teneur en soufre, chlorures, etc. (EN 13055, 2016).

VII. Perspectives de recherche et innovations

VII.1 Nouveaux matériaux biosourcés

La recherche actuelle explore (Chabannes et al., 2014 ; Elfordy et al., 2008) :

- Granulats de miscanthus (herbe à éléphant) traité thermiquement.

- Granulats de coques de noix de coco (haute résistance malgré la faible densité).
- Béton de chanvre amélioré par ajout de liants hydrauliques (ciment prompt, métakaolin) pour augmenter la résistance.

VII.2 Béton léger auto-cicatrisant

L'incorporation de bactéries (spores de *Bacillus*) dans la pâte, combinée à des granulats légers poreux contenant des nutriments, permet la précipitation de calcite pour colmater les fissures. Cette technologie est prometteuse pour améliorer la durabilité (Mehta & Monteiro, 2014).

VII.3 Béton léger à faible empreinte carbone

Substitution partielle du ciment par des additions (laitier, cendres volantes, calcaires) et utilisation de granulats légers carbonatés (stockage de CO₂). Objectif : produire un béton léger à bilan carbone neutre (Neville, 2011 ; ACI 213R, 2014).

VII.4 Fabrication additive (impression 3D) de béton léger

Les imprimantes 3D de grande taille permettent de réaliser des murs en béton léger sans coffrage. L'absence de coffrage réduit le coût, mais le béton doit présenter un seuil d'écoulement élevé (thixotropie). Les bétons légers avec adjuvants de viscosité sont adaptés (Kockal & Ozturan, 2011).

Conclusion :

L'étude bibliographique menée dans ce chapitre permet de tirer plusieurs enseignements fondamentaux pour la suite de ce travail expérimental.

Les granulats légers représentent une solution efficace pour répondre aux exigences modernes du génie civil : réduction du poids propre des structures, amélioration de l'isolation thermique, comportement sismique favorable et valorisation des ressources locales ou de déchets. Parmi toutes les familles, les granulats artificiels – et en particulier **l'argile expansée** – offrent le meilleur compromis entre légèreté, résistance mécanique, durabilité et maîtrise des coûts (ACI 213R, 2014 ; Neville, 2011). Leur structure alvéolaire fermée assure une absorption d'eau limitée et une bonne adhérence à la pâte cimentaire (Kockal & Ozturan, 2011).

Les bétons à base d'argile expansée atteignent des masses volumiques sèches de 1400 à 1900 kg/m³, soit une réduction de 25 à 35 % par rapport au béton ordinaire. Cette réduction s'accompagne d'une diminution acceptable de la résistance à la compression (15-25 MPa), encore compatible avec des applications structurelles courantes (bâtiments de faible à moyenne hauteur, maisons individuelles, ouvrages d'art secondaires). Leur conductivité thermique, de l'ordre de 0,3 à 0,6 W/m·K, les rend très performants pour l'isolation, contribuant aux objectifs de la transition énergétique (Lo et al., 2004 ; Chandra & Berntsson, 2002).

Toutefois, l'utilisation de ces bétons nécessite une formulation rigoureuse prenant en compte l'absorption des granulats, l'ouvrabilité (souvent améliorée par superplastifiants), et la prévention de la ségrégation. La durabilité doit être vérifiée vis-à-vis de la carbonatation et des cycles gel-dégel, mais avec des précautions appropriées, les bétons légers à base d'argile expansée atteignent des durées de vie de 50 ans et plus (Neville, 2011 ; EN 1992-1-1, 2004).

Cette synthèse bibliographique justifie pleinement le choix de l'argile expansée comme granulat d'étude pour la partie expérimentale. Les chapitres suivants détailleront la méthodologie de formulation, les essais de caractérisation (mécaniques, thermiques, durabilité) et l'analyse des résultats. L'objectif est de proposer un béton léger structural adapté aux conditions climatiques et réglementaires de l'Algérie (zone sismique, climat méditerranéen), tout en maîtrisant les coûts de production (Hamzaoui, 2022 ; RPA, 2024).

Problématique et axes de recherches

La question centrale de cette étude est la suivante : **dans quelle mesure la substitution totale des granulats naturels par des granulats d'argile expansée, sous ses deux formes (nodulaire et concassée), modifie-t-elle les propriétés physico-mécaniques d'un béton structuré ?** Plus précisément, on cherche à déterminer si la forme concassée, plus anguleuse et à surface spécifique élevée, améliore l'adhérence pâte-granat au point de compenser, voire d'inverser, la perte de résistance généralement observée avec les bétons légers. Trois axes de recherche structurent le travail :

1. **Caractérisation des granulats** : mesure des masses volumiques, de l'absorption d'eau et de la granularité pour adapter la formulation.
2. **Étude des propriétés à l'état frais** : ouvrabilité (cône d'Abrams) et teneur en air occlus, paramètres clés pour la mise en œuvre.
3. **Analyse des performances à l'état durci** : suivi des masses, masses volumiques, résistances à la compression et à la traction jusqu'à 28 jours, afin d'évaluer l'effet de la cure interne et de comparer les deux morphologies.

La réponse à cette problématique permettra de proposer un béton léger adapté aux conditions sismiques et climatiques de l'Algérie, tout en valorisant une ressource locale (argile expansée produite par ALGEXPAN).

Chapitre II : Matériaux & Méthodes expérimentales

I. MATERIAUX

I. 1 Introduction

Dans cette partie, les matériaux utilisés pour la confection des bétons à base de granulats naturels et des bétons à base de granulats d'argile expansée (concassés et nodulaires) seront caractérisés et présentés.

Les différents essais pour la détermination des caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques des matériaux ont été effectués dans des laboratoires spécialisés suivants :

- Laboratoire du Département de Génie Civil-FST de l'Université de Mostaganem.
- Laboratoire de recherche LCTPE de l'Université de Mostaganem.
- Laboratoire de recherche LMPC de l'Université de Mostaganem.

I. 2 Matériaux utilisés

a. Le ciment

Un ciment CPJ-CEM II 42.5 N nommé en provenance de la cimenterie GICA, fourni par l'entreprise GICA unité de Mostaganem certifié et conforme à la norme algérienne (NA442) et européenne (EN CE 197-1). Les caractéristiques physiques ainsi que l'analyse chimique moyenne de ce ciment sont présentées aux tableaux (Tableau II. 1, Tableau II. 2, Tableau II. 3).

Tableau II-1 : Caractéristique effectué dans le laboratoire.

Caractéristiques	Résultats
Masse volumique absolue	2.95 g/cm ³
Masse volumique apparente	1.04 g/cm ³
Consistance	26.5%
Début de prise	2h 38 min
Fin de prise	3h 50 min
Temps de prise	1h 12 min

Tableau II-2 : Analyse chimique depuis la fiche technique.

Caractéristiques	Valeur
Perte au feu (%) (NA 5042)	9
Teneur en sulfates (SO ₃) (%)	2.5
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	1.7
Teneur en chlorures (NA5042) (%)	0.04
C ₃ S (%)	60
C ₃ A (%)	7.5

Tableau II-3 : Propriétés physiques depuis la fiche technique.

Caractéristiques	Valeur
Consistance Normale (%)	26.5
Finesse suivant la méthode de Blaine (cm ² /g) (NA231)	4200
Retrait à 28 jours (µm/m)	950
Expansion (mm)	2.9
Début de prise (min)	150
Fin de prise (min)	230
2 jours (MPa)	11
28 jours (MPa)	44

b. Granulats

Les granulats naturels et le sable de carrière utilisés dans un mélange de béton ordinaire témoin sont issus de la carrière de HASNAOUI de SIDI BELABES. Pour un mélange de béton léger, les granulats légers d'argile expansée sont provenus de la société ALGEXPAN-ALGERIE en deux formes : Nodulaire et Concassée. Un sable de mer utilisé dans tous les mélanges provient de la carrière de SIDI LAKHDER.

On a utilisé quatre classes granulaires dans nos mélanges de béton qui sont : sable de mer 0/1 (SM), sable 0/5 (SC), gravier 3/8 (G3/8), gravier 8/16 (G8/16).

Les désignations, l'apparence et la nature des granulats naturels et des granulats légers d'argile expansée utilisé pour le malaxage du béton ordinaire sont montré dans les Tableau II. 4 et Tableau II. 5 successivement.

Tableau II. 4 : Les désignations, l'apparence et la nature des granulats naturels.

Désignation	Sable de mer SM	Sable de carrière SC	Gravier naturel 3/8 GN3/8	Gravier naturel 8/16 GN8/16
Apparence				
Nature	Siliceux d/D=0/1	Calcaire d/D=0/5	Calcaire d/D=3/8	Calcaire d/D=8/16

Tableau II. 5 : Les désignations, l'apparence et la nature des granulats légers d'argile expansée.

Nature	Argile Expansée Nodulaire			Argile Expansée Concassée		
Désignation	Sable 0/3 SN	Gravier 3/8 GN 3/8	Gravier 8/16 GN 8/16	Sable 0/3 SC	Gravier 3/8 GC 3/8	Gravier 8/16 GC 8/16
Apparence						

Pour formuler un béton à partir des granulats naturels ou granulats légers d'argile expansée, il nécessite une bonne connaissance de leur propriété, et un sable propre.

Les essais des granulats ont été réalisés au sein de laboratoire MDS/MDC au sein de notre université. Les résultats sont introduits au tableau II. 6 suivant. :

Tableau II. 6: Les caractéristiques physiques des granulats lavés obtenues par l'étude expérimentale.

		Granulats naturels				Argile Expansée					
						Nodulaire			Concassée		
Caractéristiques		SM	SC	GN 3/8	GN 8/16	SAEN 0/5	GAEN 3/8	GAEN 8/16	SAEC 0/5	GAEC 3/8	GAEC 8/16
Masse volumique (g/cm ³)	Absolue	2.63	2.5	2.62	2.66	1.86	1.32	1.42	1.75	1.33	1.26
	Apparente	1.5	1.43	1.69	1.7						
Équivalent de sable %		95.9	95.47	/	/		/	/		/	/
Module de finesse		1.2	3.6	/	/	3.61	/	/	3.02	/	/
Pourcentage des fines (%)		0.01	0.01	0.08	0.2						
Absorption (%)		0.64	1.82	0.8	0.97		9.33	6.67		10.69	10.33

La valeur d'équivalent de sable dépasse 80%, significatif d'un sable propre, ceci a été constaté lors de lavage de ce sable pour la récupération des fines.

Les courbes granulométriques des granulats sont représentées par les figures suivantes (Figure II. 1, Figure II. 2, Figure II.3) :

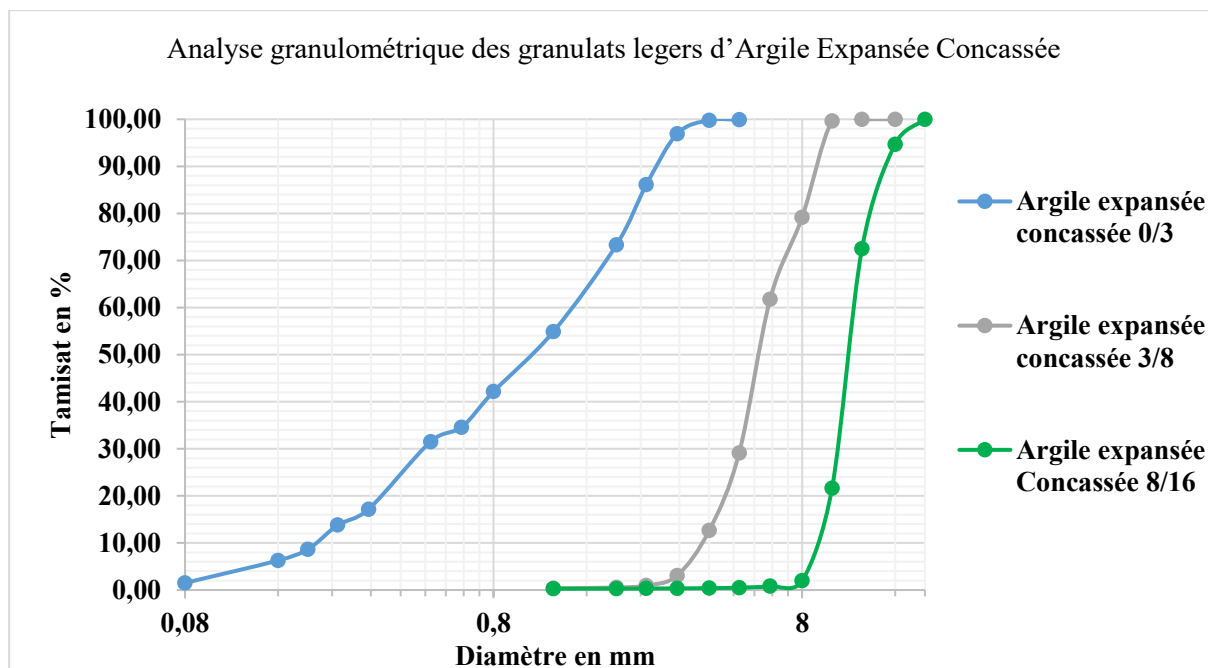


Figure II. 1 : Analyse granulométrique des granulats légers d'Argile Expandée Concassée

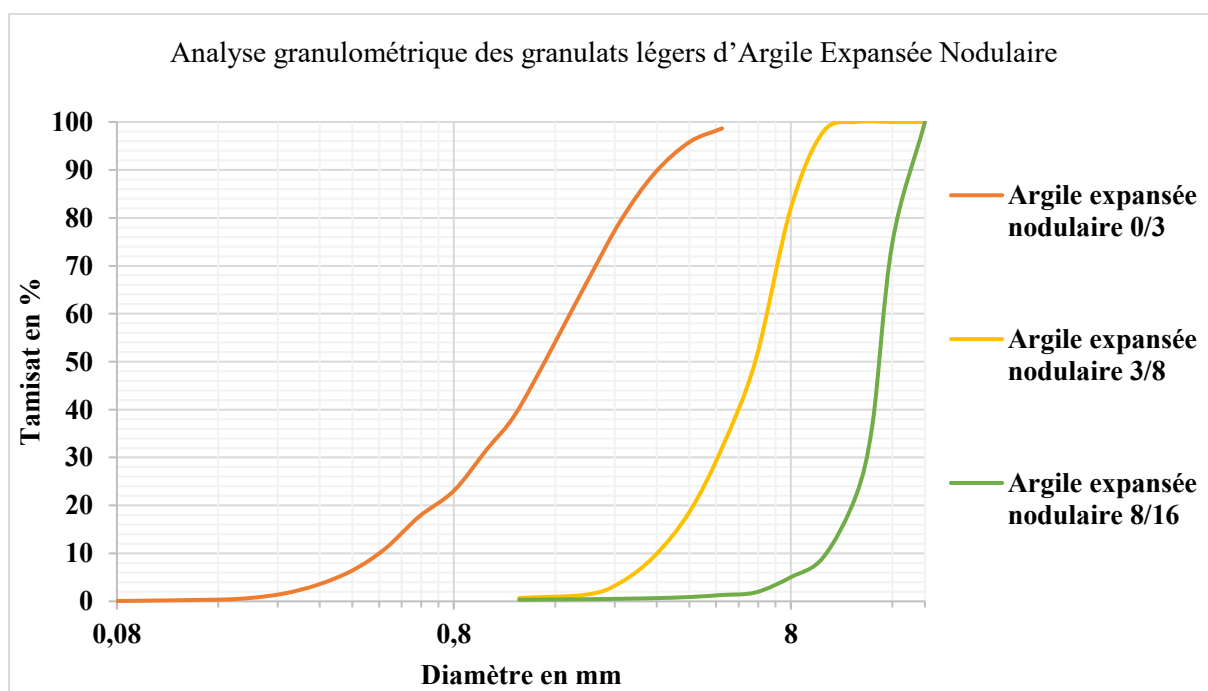


Figure II. 2 : Analyse granulométrique des granulats légers d'Argile Expandée Nodulaire

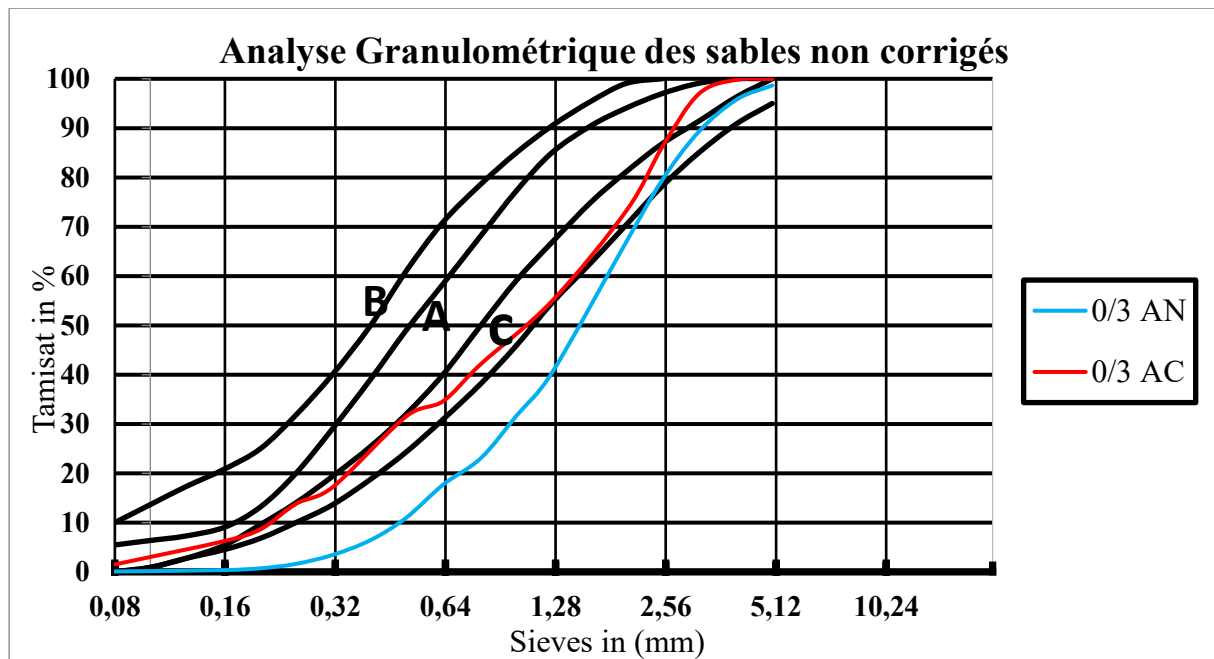


Figure II. 3 : Granulométrie des sables non corrigés

Nous remarquons que la courbe de sable de carrière n'appartient pas au fuseau privilégié, pour cette raison on a effectué des corrections par le sable de mer et les fillers calcaires en utilisant la méthode de module de finesse comme suit :

En utilisant la règle d'Abrams, on a utilisé un SC de module de finesse important $M_f=3.6$ et $M_{f2}=1.2$ pour un SM fin, afin d'obtenir un mélange dont le module de finesse serait $M_f=3$. Les proportions des deux sables sont les suivantes :

$$SC = \frac{(M_f - M_{f2})}{(M_{f1} - M_{f2})} = \frac{(3 - 1,2)}{(3,6 - 1,2)} = 0,75 = 75\%$$

$$SM = \frac{(M_{f1} - M_f)}{(M_{f1} - M_{f2})} = \frac{(3,6 - 3)}{(3,6 - 1,2)} = 0,25 = 25\%$$

La Figure II.6 représente l'analyse granulométrie des sables (avant et après correction).

Par la même règle, nous avons calculé le pourcentage des granulats nécessaire pour avoir un module de finesse préférentiel (Classe A).

Pour les granulats légers nodulaire le pourcentage de sable de mer est de 43.8% et 56.2% des granulats légers nodulaire pour obtenir un module de finesse de 2.54.

Pour les granulats légers nodulaire le pourcentage de sable de mer est de 21.4% et 78.6% des granulats légers nodulaire pour obtenir un module de finesse de 2.46.

c. Eau de gâchage :

Eau incorporée au mélange liant et granulats qui permet d'enclencher l'hydratation du ciment provoquant sa prise et de conférer au béton sa plasticité, donc son ouvrabilité. La qualité de l'eau de gâchage doit répondre à la norme NF P 18-303.

L'eau potable convient toujours. Le gâchage à l'eau de mer est à éviter, surtout pour le béton armé.

L'eau utilisée pour la préparation des différents bétons est l'eau du puit disponible au niveau du site de GICA – unité de Mostaganem

I. 3 Formulations adoptées

Le béton est formulé par la méthode de DREUX GORISSE qui repose sur les abaques et sur un choix préalable à fixer à l'avance.

On a fixé résistance à la compression de **30 MPa** à 28 jours (béton courant de bonne qualité pour bâtiment), l'affaissement de classe **S3** (béton très plastique avec **Aff=10 cm**) et le diamètre maximal **D_{max}=16 mm**.

Le béton a été formulé pour qu'à 28 jours sa résistance moyenne en compression atteigne la valeur caractéristique σ'_{28} .

Cette valeur doit, par mesure de sécurité, être supérieure de 15 % à la résistance minimale en compression f_{c28} nécessaire à la stabilité de l'ouvrage.

$$\sigma'_{28} = 1,15 \times f_{c28}$$

Dans notre cas $f_{c28}=30\text{MPa}$

$$\Rightarrow \sigma'_{28} = 1,15 \times 30 = 34,5 \text{ MPa}$$

Le choix du type de ciment était en fonction de la valeur de sa classe vraie σ'_c et des critères de mise en œuvre. La correspondance entre classe vraie du liant et valeur minimale garantie par le fabricant est donnée dans le tableau **II.7**.

Tableau II.7 : Correspondance entre classe vraie et dénomination normalisée des ciments.

Dénomination normalisée	32,5 MPa	42,5 MPa	52,5 MPa
Classe vraie σ'_c	45 MPa	55 MPa	> 60 MPa

Le ciment utilisé dans notre recherche est un ciment CPJ-CEM II 42.5 N, donc la classe vraie est :

$$\Rightarrow \sigma'_c = 55 \text{ MPA}$$

La formulation théorique se base sur les étapes suivantes :

- Détermination du rapport C/E
- Détermination de C et E
- Détermination du mélange optimal à minimum de vides
- Détermination de la compacité du béton
- Détermination des masses de granulats

1. Détermination du rapport C/E

Le rapport C / E est calculé grâce à la formule de Bolomey :

$$\sigma'_{28} = G' \sigma'_c (C/E - 0.5)$$

$$\Rightarrow C/E = (\sigma'_{28} / (G' \sigma'_c)) + 0.5$$

Avec :

C = Dosage en ciment en kg par m³ de béton

E = Dosage en eau total sur matériau sec en litre par m³ de béton

σ'_{28} = Résistance moyenne en compression du béton à 28 jours en MPa = 34.5 MPa

σ'_c = Classe vraie du ciment à 28 jours en MPa = 55 MPa

G' = Coefficient granulaire (**Tableau II.8**) fonction de la qualité et de la dimension maximale des granulats.

Tableau II.8 : Coefficient granulaire G' en fonction de la qualité et de la taille maximale des granulats D_{max}.

Qualité des granulats	Dimension Dmax des granulats		
	Fins Dmax < 12,5 mm	Moyens 20 mm < Dmax < 31,5 mm	Gros Dmax > 50 mm
Excellente	0,55	0,60	0,65
Bonne, courante	0,45	0,50	0,55
Passable	0,35	0,40	0,45

Ces valeurs supposent que le serrage du béton sera effectué dans de bonnes conditions (par vibration en principe)

Le diamètre maximum utilisé est de 16 mm

$$G'_{D_{\max}=20} = 0.5 \text{ et } G'_{D_{\max}=12.5} = 0.45$$

$$\rightarrow G' = (0.5 + 0.45) / 2 \rightarrow \boxed{G' = 0.475}$$

Le rapport C/E est, par la suite, déterminé comme suivant :

$$\Rightarrow C/E = (\sigma'_{28} / (G' \sigma'_c)) + 0.5 = (34.5 / (0.475 * 55)) + 0.5 \rightarrow \boxed{C/E = 1.82}$$

2. Détermination de C

La valeur de C est déterminée grâce à l'abaque de la figure I-1 en fonction des valeurs de C/E et de l'affaissement au cône d'Abrams.

Pour cela il suffit de positionner sur l'abaque les valeurs de C/E et de l'affaissement au cône recherchées. Le point ainsi obtenu doit être ramené parallèlement aux courbes de l'abaque pour déterminer la valeur optimale de C_{opt} .

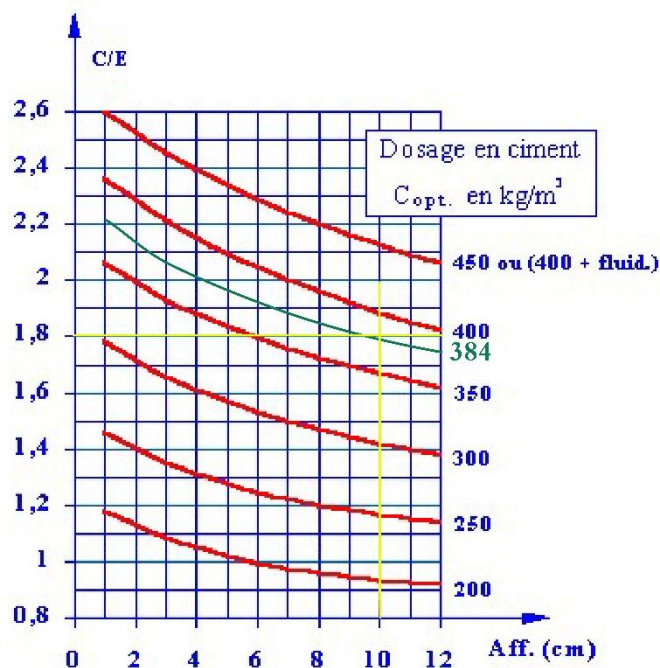


Figure II.4 : Abaque permettant la détermination de C_{opt} .

$$\Rightarrow \boxed{C_{opt} = 384 \text{ Kg}}$$

3. Détermination de E

La quantité d'eau E nécessaire à la confection du béton se calcule grâce aux valeurs de C/E et de C.

$$C/E=1.82 \text{ et } C=384 \rightarrow E=C/1.82 = 384/1.82 \rightarrow \boxed{E=211 \text{ Kg}}$$

⇒ **Corrections sur le dosage en ciment C et le dosage en eau E**

Lorsque la dimension maximale des granulats $D_{\max}$ est différente de 20 mm, une correction sur la quantité de pâte est nécessaire à l'obtention de la maniabilité souhaitée. Les corrections (**Tableau II.9**) sont à apporter sur les quantités d'eau et de ciment (le rapport C/E reste inchangé).

Tableau II.9 : Correction sur le dosage de pâte en fonction de $D_{\max}$.

Dimension maximale des granulats ($D_{\max}$ en mm)	5	8	12,5	20	31,5	50	80
Correction sur le dosage de pâte (en %)	+15	+9	+ 4	0	- 4	- 8	-12

$D_{\max}=16 \rightarrow$ Correction le dosage en eau E est de +2 %

$$\Rightarrow E=211*(1+2\%) \rightarrow \boxed{E=215.4 \text{ Kg/m}^3}$$

$$\Rightarrow C/E=1.82 \rightarrow C=1.82*E=1.82*215.4=391.7$$

$$\Rightarrow \boxed{C=392 \text{ Kg/m}^3}$$

4. Détermination du mélange optimal à minimum de vides

Pour la détermination des pourcentages des différentes classes granulaires entrant dans la formulation du squelette du béton avec un minimum de vides, on a tracé :

- ❖ Les courbes granulométriques des différents granulats (G3/8, G8/16 et Sable corrigé)
- ❖ La courbe théorique de référence d'un matériau à minimum de vide schématisée par une droite brisée.

⇒ **Détermination de la droite de référence de Dreux Gorisse :**

La droite de référence de Dreux Gorisse est définie par son abscisse X et son ordonnée Y :

- Le point O (0, 0%)
- Le point B ($D_{\max}$, 100%) $\rightarrow$ B (16, 100%)
- Le point A (X_A , Y_A) :

$$X_A = \frac{D_{\max}}{2}$$

$$Y_A = 50 - \sqrt{D_{\max}} + K' \text{ avec } K' = K + K_s + K_p$$

Y_A est donné en pourcentage de passants cumulés

K est un coefficient donné par le tableau I-8, Ks et Kp étant des coefficients correctifs définis par :

Ks (correction supplémentaire fonction de la granularité du sable) :

$K_s = (6 M_{fs} - 15)$ avec M_{fs} le module de finesse du sable.

Kp (correction supplémentaire si le béton est pompable) :

$K_p = +5$ à $+10$ selon le degré de plasticité désiré.

Tableau II.10: K, fonction de la forme des granulats, du mode de vibration et du dosage en ciment.

Vibration		Faible		Normale		Puissante	
Forme des granulats (du sable en particulier)		Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
Dosage en Ciment	400 + Fluide	-2	0	-4	-2	-6	-4
	400	0	2	-2	0	-4	-2
	350	2	4	0	2	-2	0
	300	4	6	2	4	0	2
	250	6	8	4	6	2	4
	200	8	10	6	8	4	6

Tableau II.11: Calcul des données de la droite de référence de Dreux Gorisse

Béton Témoin (BO)	Béton Argile Expandée Concassée (BC)	Béton Argile Expandée Nodulaire (BN)
$XA = \frac{D_{max}}{2} = \frac{16}{2} = 8$	$XA = \frac{D_{max}}{2} = \frac{16}{2} = 8$	$XA = \frac{D_{max}}{2} = \frac{16}{2} = 8$
$K=1$ $K_s=6*M_f-15=6*2.49-15$ $K_s=-0.06$ $K_p=0$ $K'=1-0.06+0$ $K'=0.94$ $YA = 50 - \sqrt{16} + 0.94$ $YA=46.94$	$K=1$ $K_s=6*M_f-15=6*2.46-15$ $K_s=-0.24$ $K_p=0$ $K'=1-0.24+0$ $K'=0.76$ $YA = 50 - \sqrt{16} + 0.76$ $YA=46.76$	$K=-1$ $K_s=6*M_f-15=6*2.54-15$ $K_s=0.24$ $K_p=0$ $K'=1+0.24+0$ $K'=1.24$ $YA = 50 - \sqrt{16} + 1.24$ $YA=47.24$
$\Rightarrow A (8, 46.94\%)$	$\Rightarrow A (8, 46.76\%)$	$\Rightarrow A (8, 47.24\%)$

$\Rightarrow$ On dessine le point A et on prend les pourcentages pour chaque type de béton.

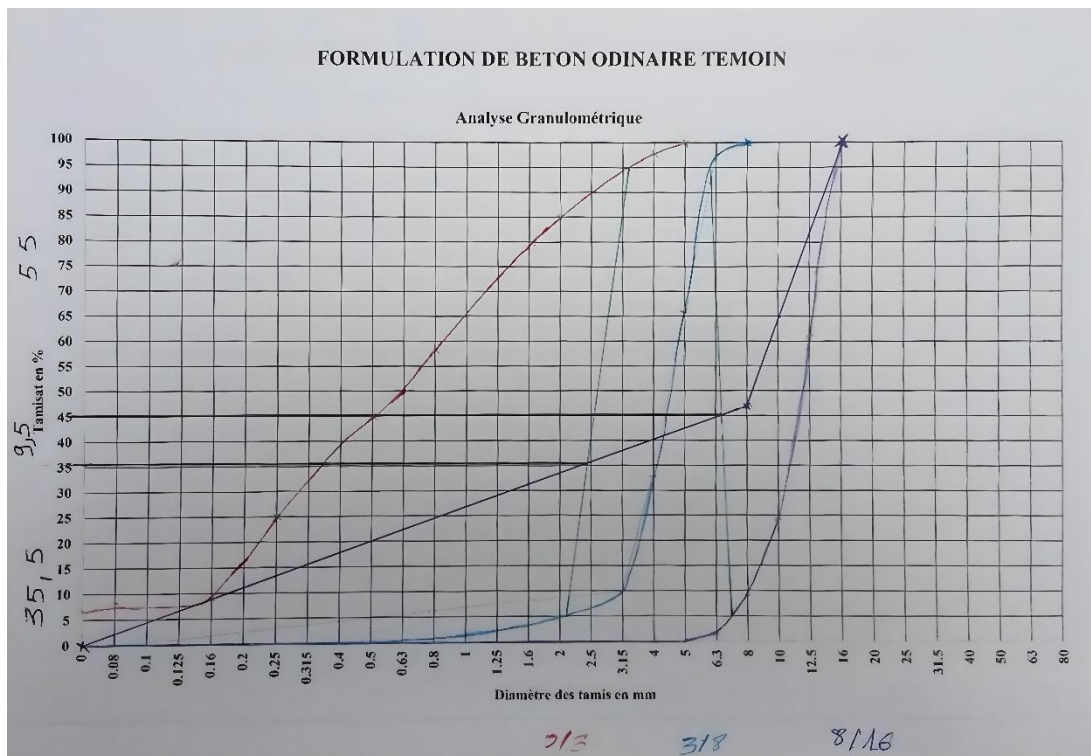


Figure II. 5: Formulation de Béton Ordinaire Témoin.

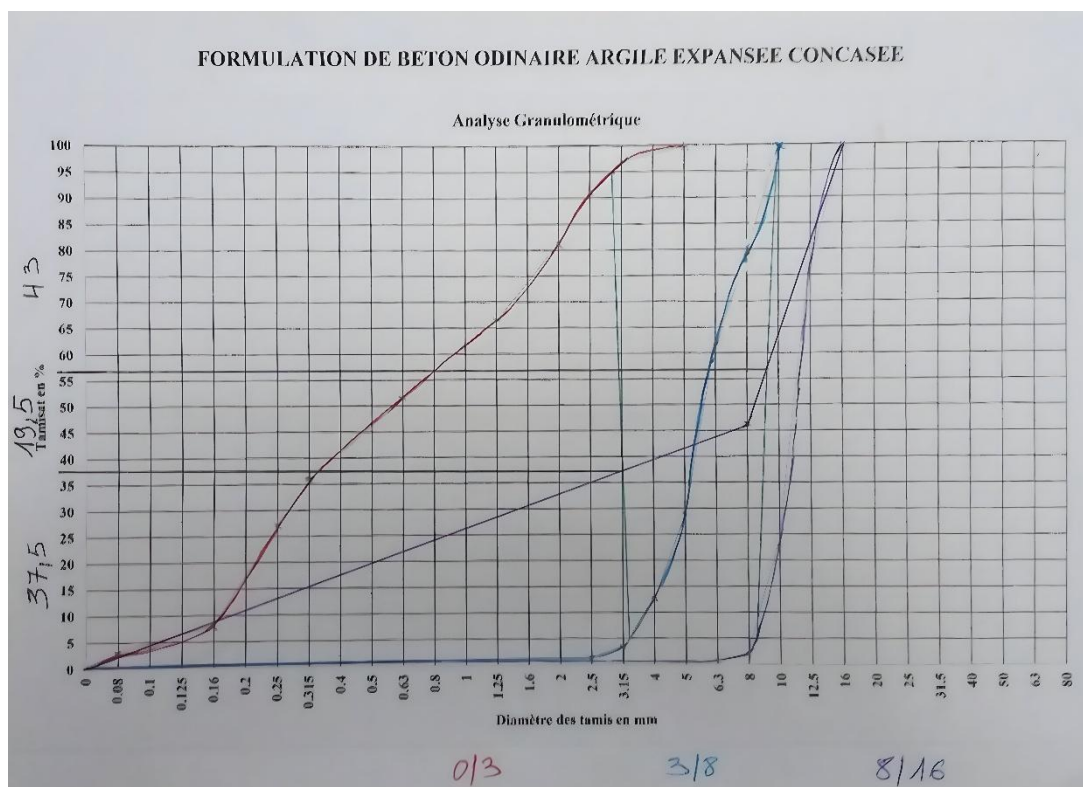


Figure II. 6: Formulation de Béton Ordinaire d'Argile Expandée Concassée.

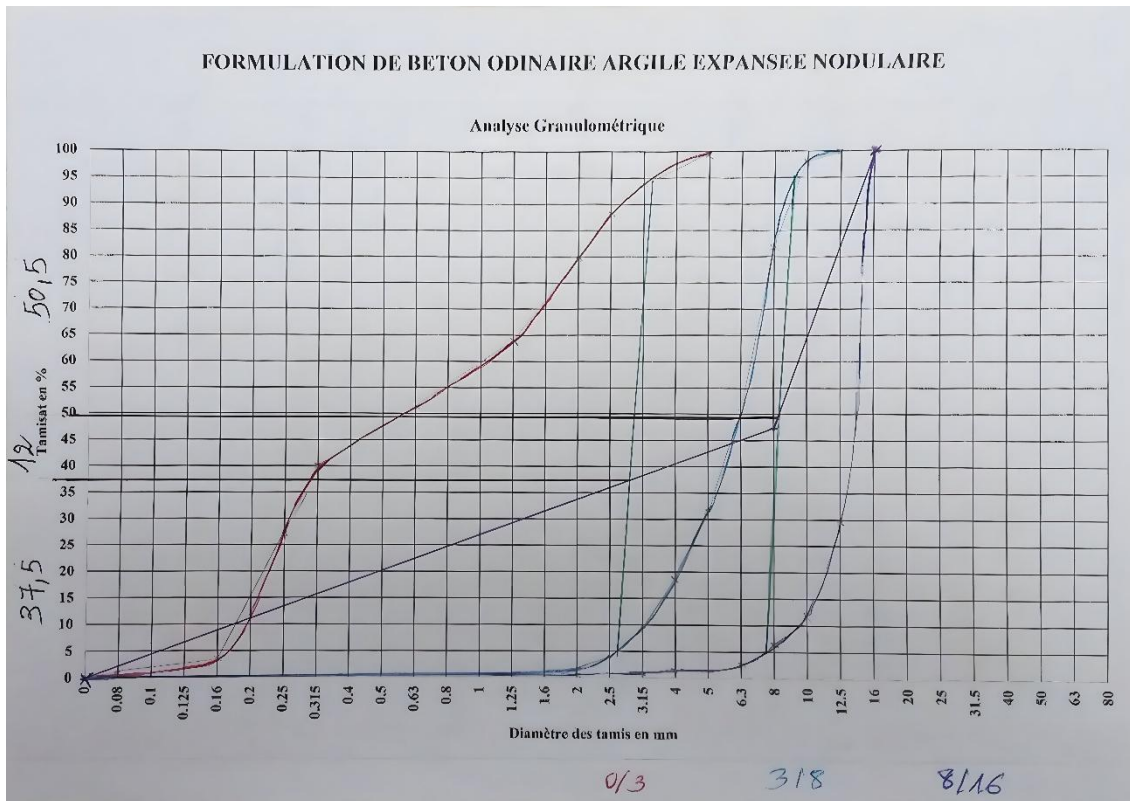


Figure II. 7: Formulation de Béton Ordinaire d'Argile Expansée Nodulaire.

5. Détermination de la compacité du béton

Pour déterminer les masses de granulats entrant dans la composition de béton, il est nécessaire de déterminer la compacité du béton qui correspond au volume absolu en m³ de solide contenu dans un mètre cube de béton

$$C = C_0 + C_1 + C_2 + C_3$$

La valeur de la compacité c du béton permet de déterminer le volume total absolu V de granulats intervenant dans la formulation du béton : $V = (c - V_c)$ où V_c est le volume de ciment défini par $V_c = C / \rho_s(c)$ où $\rho_s(c)$ est la masse volumique absolue du ciment utilisé.

Tableau II.12 : Compacité du béton en fonction de Dmax, de la consistance et du serrage.

Consistance	Serrage	Compacité (c0)						
		Dmax= 5	Dmax= 8	Dmax=12,5	Dmax = 20	Dmax=31,5	Dmax = 50	Dmax = 80
Molle (TP-FI)	Piquage	0,750	0,780	0,795	0,805	0,810	0,815	0,820
	Vibration faible	0,755	0,785	0,800	0,810	0,815	0,820	0,825
	Vibration normale	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
Plastique (P)	Piquage	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
	Vibration faible	0,765	0,795	0,810	0,820	0,825	0,830	0,835
	Vibration normale	0,770	0,800	0,815	0,825	0,830	0,835	0,840
	Vibration puissante	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
Ferme (F)	Vibration faible	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
	Vibration normale	0,780	0,810	0,825	0,835	0,840	0,845	0,850
	Vibration puissante	0,785	0,815	0,830	0,840	0,845	0,850	0,855

Note :

* Ces valeurs sont convenables pour des granulats roulés sinon il conviendra d'apporter les corrections suivantes : -

Sable roulé et gravier concassé (c1 = - 0,01)

- Sable et gravier concassé (c1 = - 0,03)

* Pour les granulats légers on pourra diminuer de 0,03 les valeurs de c : (c2 = -0.03)

* Pour un dosage en ciment $C \neq 350 \text{ kg/m}^3$ on apportera le terme correctif suivant : (c3 = $(C - 350) / 5000$)

Tableau II.13: Calcul de la compacité de béton.

Béton Témoin (BO)	Béton Argile Expandée Concassée (BC)	Béton Argile Expandée Nodulaire (BN)
$C0=(0.815+0.825)/2 = 0.820$ $C1=-0.03$ $C2=0.00$ $C3 = \frac{C - 350}{5000} = \frac{392 - 350}{5000}$ $C3=0.0084$ $C=0.820-0.03+0+0.0084$ →C=0.7984	$C0=(0.815+0.825)/2 = 0.820$ $C1=-0.03$ $C2=-0.03$ $C3 = \frac{C - 350}{5000} = \frac{392 - 350}{5000}$ $C3=0.0084$ $C=0.820-0.03-0.03+0.0084$ →C=0.7684	$C0=(0.815+0.825)/2 = 0.820$ $C1=-0.03$ $C2=0.00$ $C3 = \frac{C - 350}{5000} = \frac{392 - 350}{5000}$ $C3=0.0084$ $C=0.820-0.01-0.03+0.0084$ →C=0.7884
$Vg=C-Vc$ $V_g = 798.4 - \frac{392}{2.95}$ →Vg=665.52 Kg/m³	$Vg=C-Vc$ $V_g = 768.4 - \frac{392}{2.95}$ →Vg=635.52 Kg/m³	$Vg=C-Vc$ $V_g = 788.4 - \frac{392}{2.95}$ →Vg=655.52 Kg/m³

6. Détermination des masses de granulats

Connaissant le volume total absolu des granulats (V) et les pourcentages en volume absolue de sable (S %), de gravillon (g %) et de gravier (G %), il est alors possible de déterminer les volumes de sable (Vs) de gravillon (Vg) et de gravier (VG) ainsi que leurs masses respectives (S, g et G) :

$$\begin{aligned} V_S &= V * S \% & S &= V * S \% * \rho_{\text{abs}}(S) \\ V_g &= V * g \% & g &= V * g \% * \rho_{\text{abs}}(g) \\ V_G &= V * G \% & G &= V * G \% * \rho_{\text{abs}}(G) \end{aligned}$$

Tableau II.14: Calcul du volume et des quantités des granulats pour 1 m³ de béton.

Béton Témoin (BO)	Béton Argile Expansée Concassée (BC)	Béton Argile Expansée Nodulaire (BN)
<u>Volumes :</u> $V_{G3/8}=665.52*9.5\%$ → $V_{G3/8}=63.22$ L $V_{G8/16}=665.52*55\%$ → $V_{G8/16}=366.04$ L $V_{SM}=665.52*35.5\%*25\%$ → $V_{SM}=59.06$ L $V_{SC}=665.52*35.5\%*75\%$ → $V_{SC}=177.19$ L	<u>Volumes :</u> $V_{G3/8}=635.52*19.5\%$ → $V_{G3/8}=123.93$ L $V_{G8/16}=635.52*43\%$ → $V_{G8/16}=273.27$ L $V_{SM}=635.52*37.5*21.4\%$ → $V_{SM}=51.00$ L $V_{SC}=635.52*37.5\%*78.6\%$ → $V_{SAC}=187.32$ L	<u>Volumes :</u> $V_{G3/8}=655.52*12\%$ → $V_{G3/8}=78.66$ L $V_{G8/16}=655.52*50.5\%$ → $V_{G8/16}=331.04$ L $V_{SM}=665.52*37.5\%*43.8\%$ → $V_{SM}=107.67$ L $V_{SC}=655.52*37.5\%*56.2\%$ → $V_{SAN}=138.15$ L
<u>Quantités :</u> $M_{G3/8}=63.22*2.62$ → $M_{G3/8}=168.17$ Kg $M_{G8/16}=366.04*2.66$ → $M_{G8/16}=973.67$ Kg $M_{SM}=59.06*2.63$ → $M_{SM}=155.33$ Kg $M_{SC}=177.19*2.50$ → $M_{SC}=442.98$ Kg	<u>Quantités :</u> $M_{G3/8}=123.93*1.33$ → $M_{G3/8}=164.93$ Kg $M_{G8/16}=273.27*1.26$ → $M_{G8/16}=344.32$ Kg $M_{SM}=51.00*2.63$ → $M_{SM}=134.13$ Kg $M_{SC}=187.32*1.75$ → $M_{SAC}=327.81$ Kg	<u>Quantités :</u> $M_{G3/8}=78.66*1.32$ → $M_{G3/8}=103.83$ Kg $M_{G8/16}=331.04*1.42$ → $M_{G8/16}=470.08$ Kg $M_{SM}=107.67*2.63$ → $M_{SM}=283.17$ Kg $M_{SC}=138.15*1.86$ → $M_{SAN}=256.96$ Kg
G/S=1.91	G/S=1.10	G/S=1.06

7. Comparaison des trois formulations

Le Tableau II. 15 montre les différentes compositions des bétons ordinaires et ceux à base des granulats d'argile expansée.

Tableau II. 15: Comparaison entre les trois formulations.

Matériaux en (Kg)	Pour 1 m ³ (kg)		
	BO	BC	BN
C	392	392	392
E	215	215	215
SM	168.17	164.83	103.83
SC	973.67	344.32	470.08
G3/8	155.33	134.13	283.17
G8/16	442.98	327.81	256.96

I. 4 Préparation des éprouvettes

Les moules normalisés utilisés pour la confection des éprouvettes sont des moules normalisés en acier de forme prismatique (7x7x28 cm³) et les moules (15x15x15 cm³) :



Figure II. 8 : Les moules utilisés

À la suite d'un pré mouillage et séchage de malaxeur (à axe verticale d'une capacité de 17 litres), les matériaux y sont mis du plus gros au plus fin granulat (graviers, sables), puis on introduit la quantité de ciment déterminée. Un malaxage à sec des différents constituants, (durée allant de 60 à 90 secondes). Puis en ajoutant progressivement les 2/3 de la quantité d'eau gâchage mélangée à l'adjuvant pendant 2 minutes. Introduire la partie restante d'eau (1/3) graduellement et malaxer pendant 2 minutes.

Le remplissage des moules a été fait en deux couches, après chaque couche, les moules ont été vibrés pendant 30 secondes à l'aide d'une table vibrante. Juste après, leurs vibrations, chaque moule a été couvert avec une feuille plastique pour éviter l'évaporation de l'eau et stocké dans l'ambiance du laboratoire. Le démoulage de toutes les éprouvettes a été effectué 24 h après le coulage.



Figure II. 9 : Préparation des éprouvettes du béton.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons identifié tous les matériaux entrant dans la composition des bétons ordinaires et bétons de granulats d'argile expansées, puis nous avons déterminé les formulations des bétons utilisés en utilisant la méthode de Dreux-Gorisse, cette méthode étant la plus utilisée pour la formulation des bétons et la plus facile à manipuler.

II. METHODES EXPERIMENTALES

II. 1 Introduction

La formulation des différents bétons ordinaires s'est faite avec les mêmes matériaux et pour toutes les échéances.

La fabrication des bétons ordinaires a pu être réalisée sans problème avec des moyens conventionnels.

Pour avoir un béton conforme aux normes en vigueur, nous avons effectués des essais de caractérisation physique et chimique de ces composants.

Nous avons effectué des essais qui qualifient les différentes propriétés du béton :

- ✓ A l'état frais : estimer leur étalement au cône d'Abrams
- ✓ A l'état durci : procéder au suivi des propriétés mécaniques à différents échéanciers en mesurant les résistances à la compression et traction par flexion.

II. 2 Essais de caractérisation physiques des matériaux

II. 2. 1 Équivalent de sable (NF P18-598)

Le sable est un élément très essentiel qui joue un rôle très important dans la composition des bétons. Pour cela, il faut être vigilant dans le choix du sable qui répond aux normes. Ses caractéristiques doivent conduire à un béton de bonne qualité. Cet essai est utilisé de manière courante pour évaluer la propreté des sables utilisés pour la composition du béton. L'essai consiste à séparer les particules fines contenues dans le sable, une procédure normalisée permet de définir un coefficient de l'équivalent de sable qui quantifie la propreté du sable.

L'essai est effectué sur fraction 0/5 mm du granulat. On a rempli l'éprouvette jusqu' au premier repère avec la solution lavante, puis on a introduit l'échantillon avec l'entonnoir donné des petits coups sur l'éprouvette afin de déloger les bulles d'air et laisser imbiber pendant 10 min. On ferme l'éprouvette et on secoue (90 cycles de 20cm de course dans le sens horizontal en 30 s) manuellement. On a ôté le bouchon rincé au-dessus avec la solution lavante. On a introduit ensuite le tube de laveur au fond de l'éprouvette et on a lavé pour la suspension des éléments argileux et attendu pendant 20min. On a mesuré à l'aide du réglet la hauteur h_1 du niveau supérieur du floculat par rapport au fond de l'éprouvette puis la hauteur h_2 du niveau supérieur de la partie sédimentée par rapport au fond de l'éprouvette (Figure II. 12). Puis on a appliqué la formule

$$ES = \frac{h_2}{h_1} * 100$$



Figure II. 10 : Essai d'équivalent de sable.

II. 2. 2 Analyse granulométrique (EN 933-1 et EN 933-2)

L'analyse granulométrique est la distribution en poids des particules solides d'un sol suivant leurs dimensions. Elle permet de différencier les sols entre eux, roche, gravier, sable, argile...etc.

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis (Figure II. 13), dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le tamisage des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis contenant l'échantillon.

La quantité à utiliser doit répondre à différents impératifs qui sont contradictoires :

- Il faut une quantité assez grande pour que l'échantillon soit représentatif.
- Il faut une quantité assez faible pour que la durée de l'essai soit acceptable et que les tamis ne soient pas saturés et donc inopérants.

Dans le pratique, la masse utilisée sera telle que : $m \geq 0.2D$ avec M : masse de l'échantillon en kg et D diamètre du plus gros granulat exprimé en mm

En fonction de la dimension d/D des matériaux analysés, on utilisera la série de tamis préconisée par la norme **EN 933-2** ainsi que tous les tamis nécessaires à la couverture des dimension comprises entre **0.063mm** et **2 mm** pour les fillers, entre **0.08mm** et **2D** pour les sablons et les sables, et entre **0.63d** et **2D** pour les gravillons (**norme XP P 18-540**).

Le résultat de la granulométrie se traduit par une courbe dont l'ordonnée y représente le pourcentage de tamisâts passants, et l'abscisse x représente les ouvertures de tamis.



Figure II. 11 : Analyse granulométrique.

II. 2. 3 Module de finesse (NF P18-304)

Le module de finesse est un nombre compris entre 1.8 et 3.3 qui caractérise la finesse des granulats du matériau.

Le module de finesse est défini selon la norme française [NFP 18-540] par le 1/100 de la somme des refus cumulés exprimés en pourcentages sur les différents tamis de la série suivante : 0.16 ; 0.315 ; 0.63 ; 1.25 ; 2.5 ; 5.

Le module de finesse sert à évaluer la grosseur du sable. Lorsque MF est compris entre :

- 1.8 et 2.2 : le sable est à majorité de grains fins,
- 2.2 et 2.8 : on est en présence d'un sable préférentiel,
- 2.8 et 3.3 : le sable est un peu grossier.

II. 2. 4 La masse volumique apparente

La masse volumique apparente est une grandeur physique qui caractérise la masse d'un matériau par unité volume, (pores et vides compris). Plus au moins poreux, elle est en Kg/m^3 g/cm^3 T/m^3 . Le symbole de la masse volumique est $\rho = M_t / V_t$.

La masse volumique est le synonyme moderne des expressions désuètes « densité absolue » et « densité propre », ou encore « masse spécifique ».

La masse volumique d'un liquide, d'un solide ou d'une pâte peut être déterminée avec un pycnomètre.

On a rempli un récipient dont on connaît le volume $V = 1\text{L}$ en granulat avec une hauteur de 10 cm entre la main et le récipient cylindre, en prenant de grandes précautions pour éviter les phénomènes parasites provoqués par le tassement. On racle le granulat avec une règle. On pèse ensuite l'échantillon en prenant soin de déduire la masse du récipient. La masse de l'échantillon

est divisée par le volume du récipient pour donner la masse volumique apparente du matériau (Figure II. 14).

Soit : M1 : la masse du cylindre vide

M2 : la masse du cylindre plein

VT : le volume total intérieur du cylindre ($V = 1L$)

La masse volumique : $MV = (M2 - M1) / VT$;



Figure II. 12: Détermination des masses volumiques apparentes des matériaux utilisés

L'essai sera répété 3 fois pour la fiabilité des résultats pour chaque matériau.

II. 2. 5 La masse volumique absolue

La masse volumique absolue d'un matériau est la masse d'un mètre cube de ce matériau, déduction faite de tous les vides, aussi bien des vides entre les grains que des vides à l'intérieur des grains.

Elle est déterminée ; pour les granulats ; à l'aide d'une éprouvette graduée (Figure II. 15). On remplit l'éprouvette en eau jusqu'au repère V1. On pèse une masse de granulat M puis on la verse dans l'éprouvette. On prend le nouveau volume (volume d'eau + granulat) V2. On calcule la masse volumique par la loi $\rho_s = M / (V2 - V1)$.



Figure II. 13 : Les masses volumiques absolues à l'aide d'une éprouvette graduée

Remarque :

On doit utiliser un liquide non réactif au ciment pour déterminer la masse volumique absolue du ciment ex : Toluène (méthyle benzène) ou Naphta lourd (white spirit). (Figure II. 16)

La masse volumique absolue du ciment a été déterminée selon la norme [NF P 18-555], par le pycnomètre de Le Chatelier et le benzène



Figure II. 14 : La masse volumique du ciment avec du benzène

II. 2. 6 Absorption des granulats légers (NF EN 1097-6)

La mesure du coefficient d'absorption des granulats légers a été réalisée en se basant sur le Protocole décrit dans la norme (NF EN 1097-6). Au préalable les échantillons sont étuvés à $80^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ jusqu'à stabilisation de leur masse, constituant la masse sèche.

La **méthode du chiffon** est la seule méthode que nous présenterons puisque c'est la méthode utilisée dans le programme expérimental.

La **méthode du chiffon** (NF EN 1097-6) a été utilisée pour mesurer les quantités d'eau nécessaires à la pré-saturation des granulats recyclés (Figure II. 19) :

- On a pesé une quantité (M_s) des granulats légers des classes granulaires 3/8 et 8/16 après les avoir étuvés à 80°C , pour ne pas détériorer les constituants de la pâte de ciment durcie (notamment l'ettringite et les CSH)
- On a mis les granulats légers dans un pycnomètre et rempli d'eau.

- On a suivi l'absorption d'eau dans chaque intervalle de temps : **5 min, 10 min, 15 min, 30 min, 1 h, 2h, 6h, 12h, 24h et 72 h**. Pour ces mesures, on étale les granulats récupérés du pycnomètre sur un tissu sec, on sèche les granulats en surface puis on les transferts sur un autre chiffon. On les laisse sécher à l'air libre jusqu'à ce que les films d'eau visibles disparaissent, et on note la masse (Ma).

- On calcule alors le taux d'absorption d'eau des granulats légers (Ab) par la relation suivante :

$$Ab\% = (Ma - Ms) / Ms \times 100 \quad (1)$$

Avec :

Ma= la masse de l'échantillon imbibé par l'eau (humide)

Ms= la masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve à 80 °C



Figure II. 15 : Le mode opératoire de l'essai d'absorption d'eau par la méthode de chiffon

II. 3 Essais de caractérisations bétons à l'état frais

II. 3. 1 Essais de cône d'Abrams (NF P 18 451) :

La plaque d'appui et le moule fixé sur cette dernière sont légèrement humidifiés. Le béton est introduit dans le moule en 3 couches d'égales hauteurs qui seront mises en place au moyen de la tige de piquage actionnée 25 fois par couche. Après avoir arasé en roulant la tige de piquage sur le bord supérieur du moule, le démoulage s'opère en soulevant le moule avec précaution. Le béton n'étant plus maintenu s'affaisse plus ou moins, suivant sa consistance. Celle-ci est caractérisée par cet affaissement, noté A, mesuré grâce au portique et arrondi au centimètre le plus proche. La mesure doit être effectuée sur le point le plus haut du béton et dans la minute qui suit le démoulage (**Figure II. 20**).



Figure II. 18 : L'essai d'affaissement au cône d'Abrams (béton nodulaire)

II. 3. 2 Teneur en air occlus du béton frais (Norme EN 12350-7) :

La teneur en air occlus (ou air entraîné naturellement) correspond au volume d'air emprisonné dans le béton frais lors du malaxage, de la mise en œuvre et du compactage. Elle est exprimée en pourcentage du volume total du béton.

Ces bulles d'air sont généralement de dimensions relativement importantes et réparties de manière aléatoire dans la pâte cimentaire.



Figure II. 16 : Mise en place du béton frais pour mesurer la teneur en air (BN) .



Figure II. 18 : Résultats de l'essai d'air occlus sur les différents bétons.

Le principe de mesure est le suivant :

- Le béton frais est placé dans une cuve étanche.
- Une pression d'air est appliquée.
- La variation de pression permet de déterminer le volume d'air contenu.

Cette méthode est la plus utilisée pour les bétons ordinaires.

Pour les bétons légers (Kockal and Ozturan 2011) :

- La mesure de l'air est plus délicate ;
- Les granulats poreux peuvent perturber la méthode de pression ;
- La méthode volumétrique est souvent recommandée.

Les teneurs observées sont généralement comprises entre :

$$2\% \leq A \leq 6\%$$

Selon :

- Le taux de substitution des granulats légers ;
- La pré-humidification ;
- L'utilisation ou non d'adjuvants.

La teneur en air occlus constitue un paramètre essentiel du béton frais. Elle influence directement la masse volumique, l'ouvrabilité, la résistance mécanique et la durabilité du matériau. Dans les bétons légers à base d'argile expansée, sa maîtrise est particulièrement importante car elle contribue à l'allègement du béton tout en pouvant affecter significativement

ses performances mécaniques. Une teneur en air comprise entre **2 et 5 %** est généralement recherchée pour obtenir un bon compromis entre légèreté, résistance et durabilité (Lo, T.Y., & al. 2004).

II. 4 Essais de caractérisations bétons a l'état durci

II. 4. 1 Essais de caractérisations mécaniques des bétons

II. 4.1. 1 Essai de traction par flexion par trois points

Il détermine la contrainte de traction par flexion σ_{tf} conduisant à l'écrasement d'une éprouvette de béton. Il s'effectue sur les éprouvettes prismatiques (7 x 7 x 28) cm³. Les essais sont réalisés avec une vitesse de chargement de 0,5 MPa/s (figure II. 26). Ils sont élaborés au laboratoire de la pathologie LMPC du l'université de Mostaganem.

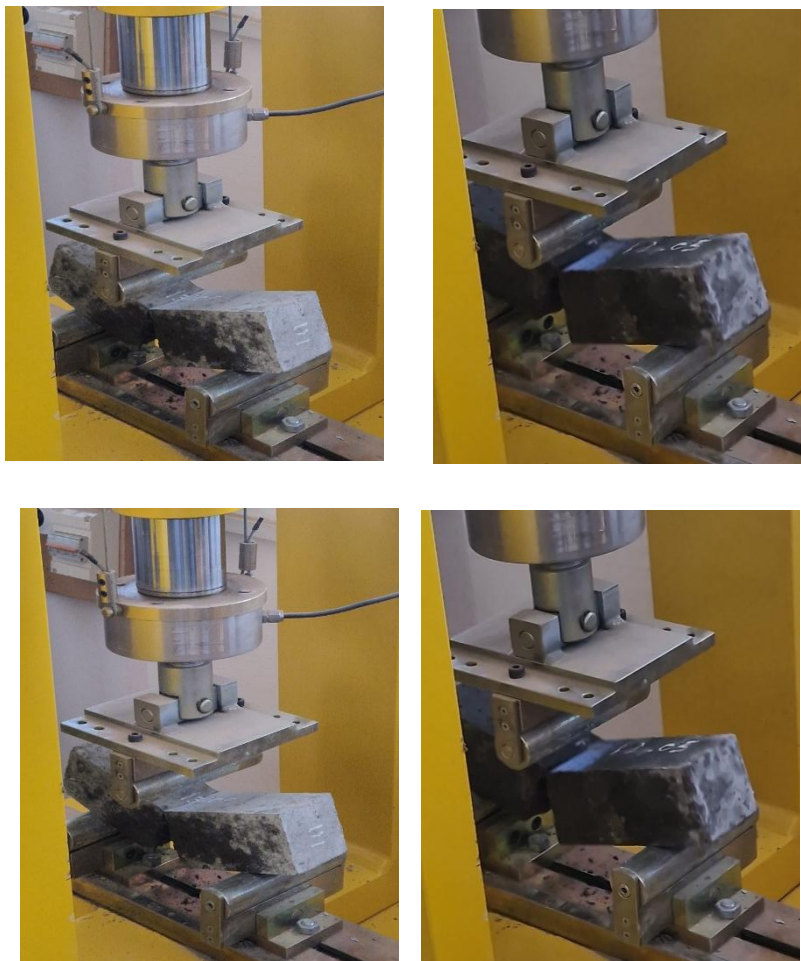


Figure II. 19 : Essai de traction par flexion.

II. 4.1. 2 Essai de compression

Il s'agit de déterminer la contrainte de compression σ_c conduisant à l'écrasement d'une éprouvette de béton. Il s'effectue sur les deux parts des éprouvettes prismatiques (7 x 7 x 28) cm³ obtenues après la traction par flexion.

La presse utilisée est d'une capacité maximale de 3000 kN, asservie en force. La résistance en compression a été évaluée suivant la norme [NF P 18-455]. Les essais ont été réalisés avec une vitesse de chargement de 0,5 MPa/s (figure II. 27).

Les essais d'écrasements en compression ont été effectués au laboratoire de l'entreprise GICA, unité de Mostaganem.



Figure II. 20 : Essai de compression.

Pour passer de la résistance à la compression mesurée sur éprouvette cubique (généralement 150 mm d'arête) à la résistance sur éprouvette cylindrique (150 mm de diamètre × 300 mm de

hauteur), les normes européennes (Eurocode 2 – EN 1992-1-1 et EN 206) utilisent une relation qui n'est pas un coefficient unique, mais un ensemble de rapports qui varient légèrement selon la classe de résistance du béton (de 0,78 à 0,87). En pratique, pour les bétons courants (C25/30, C30/37, etc.), le rapport cylindre/cube est souvent proche de 0,83, c'est-à-dire que la résistance sur cylindre est environ 20 % inférieure à celle sur cube. Il est également fréquent de trouver, par simplification, un coefficient de 0,8, comme le mentionne l'Eurocode 2. Pour une conversion précise, il convient de se référer au tableau des classes de résistance de la norme NF EN 206, qui donne la correspondance officielle entre les deux grandeurs.

Conclusion

Dans ce chapitre on a défini les modes opératoires qui donnent les caractéristiques physiques des matériaux, la méthode de quantification d'eau absorbée par les granulats légers, les modes de malaxage et de coulage du béton. Nous avons aussi présenté les essais de caractérisation physiques et mécaniques des bétons ordinaires.

Chapitre III : Résultats et analyses

Chapitre III : Résultats et analyses

3.1. Présentation des matériaux étudiés

Trois formulations de béton ont été préparées et comparées dans cette étude :

- **BO (Béton Ordinaire)** : béton témoin à base de granulats naturels concassés (sables et graviers).
- **BC (Béton Concassé)** : béton léger dont les granulats sont en argile expansée de forme **concassée**.
- **BN (Béton Nodulaire)** : béton léger dont les granulats sont en argile expansée de forme **nodulaire**.

L'argile expansée (Expanded Clay Aggregate, ECA) est un granulat artificiel léger obtenu par cuisson de l'argile à haute température (1100–1300 °C), ce qui lui confère une structure cellulaire interne unique composée de nombreuses alvéoles remplies d'air. Khan et al. (2024) soulignent que cette structure alvéolaire, associée à la composition céramique de l'ECA, lui confère d'excellentes propriétés telles qu'une bonne isolation thermique et acoustique, une inertie chimique et une résistance au feu.

L'objectif de ce chapitre est de quantifier l'influence du type de granulat et de sa forme sur les propriétés à l'état frais et à l'état durci, et de confronter les résultats obtenus aux données de la littérature scientifique internationale.

3.2. Propriétés à l'état frais

3.2.1. Teneur en air occlus et affaissement

Le tableau suivant présente l'essentiel des résultats obtenus sur les différents bétons à l'état frais.

Tableau III.1 : Taux d'air occlus et affaissement des trois bétons

Béton	BO	BC	BN
Air occlus (%)	2,0	4,0	6,0
Affaissement (cm)	9,0	13,5	12,5

La figure ci-dessous présente **les variations de l'air occlus** des différents bétons à l'état frais.

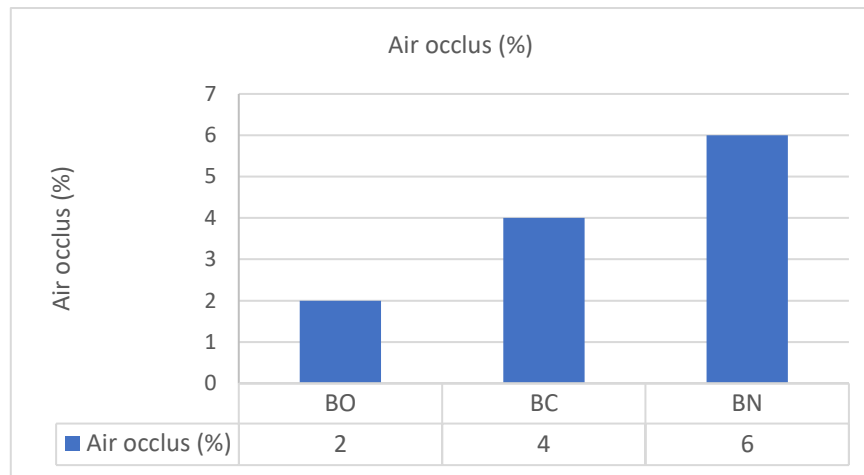


Figure III. 1 : Air occlus des différents bétons

Le béton ordinaire présente une teneur en air occlus de 2 %, valeur typique d'un béton de granulats denses non entraîneur d'air, généralement comprise entre 1,5 % et 2,5 %. L'augmentation à 4 % pour BC puis à 6 % pour BN est directement liée à la porosité interne des granulats d'argile expansée. Selon le travail de Selman et Abbas (2022), l'incorporation de granulats d'argile expansée modifie sensiblement les propriétés à l'état frais, notamment la porosité et la masse volumique. La nature poreuse des granulats légers d'argile expansée est en effet reconnue comme un facteur décisif dans les propriétés physiques et mécaniques du béton.

La différence entre les deux bétons légers mérite une attention particulière : le béton nodulaire (BN) retient davantage d'air (6 %) que le béton concassé (4 %). Cette observation peut s'expliquer par la meilleure intégrité structurale des nodules, dont les alvéoles sont mieux préservées lors du malaxage, tandis que les arêtes vives des granulats concassés favorisent l'éclatement d'une partie des bulles d'air emprisonnées.

La figure suivante montre les différentes **valeurs mesurées des affaissements** des différents bétons.

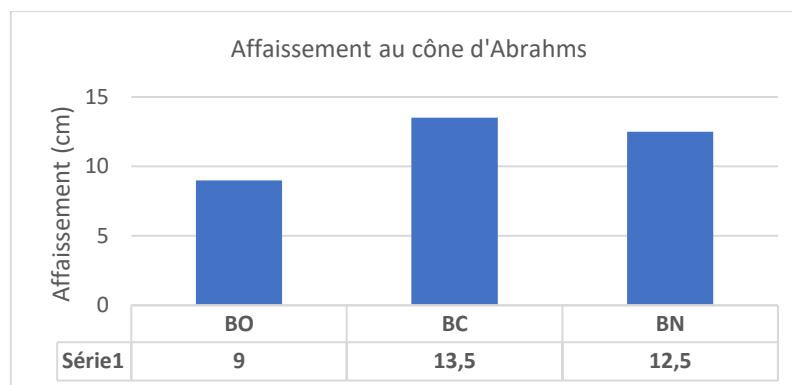


Figure III. 2 : Affaissements des différents bétons

L'affaissement du béton ordinaire (9 cm) correspond à un béton ferme-plastique. Les valeurs plus élevées de BC (13,5 cm) et BN (12,5 cm) montrent que les granulats d'argile expansée améliorent sensiblement l'ouvrabilité. Selman et Abbas (2022) confirment que les granulats d'argile expansée améliorent effectivement la maniabilité du béton. Cette amélioration s'explique par plusieurs facteurs conjugués :

- La **faible densité** des granulats d'argile expansée réduit les frottements intergranulaires.
- La **forme arrondie** (particulièrement pour BN) facilite l'écoulement du mélange.
- L'**absorption rapide d'eau** par les granulats poreux peut temporairement réduire l'eau libre, mais l'effet global reste favorable à la maniabilité.

Il est intéressant de noter que le béton concassé (BC) présente l'affaissement le plus élevé (13,5 cm) malgré ses arêtes vives, ce qui suggère que d'autres paramètres (tels que la répartition granulaire ou la teneur en eau efficace) influencent également la rhéologie.

Vinoth et Vinod Kumar (2020) ont étudié cinq mélanges différents de béton autoplaçant léger à base d'argile expansé et ont montré qu'il est possible d'obtenir d'excellentes propriétés d'ouvrabilité tout en maintenant des performances mécaniques satisfaisantes. Abdelaziz (2010) a également démontré que l'utilisation d'un agent d'auto-plaçant (superplastifiant à base de polycarboxylate) permet d'obtenir un béton structural léger de faible densité avec des caractéristiques d'auto-plaçabilité élevées (fluidité, déformabilité et stabilité).

3.3. Pertes de masse (séchage)

Le tableau III.2 suivant donne les valeurs des masses mesurées avant chaque essai de compression. Ces valeurs diminuent en fonction du temps.

Tableau III.2 : Diminution des masses des bétons (g)

	Diminution des masses (g)			
	2j	7j	14j	28j
BO	8007	7970	7725	7633
BC	5836,5	5749	5690,5	5595
BN	5827,5	5730	5676	5627,5

La représentation graphique de ces résultats est donnée par la figure suivante :

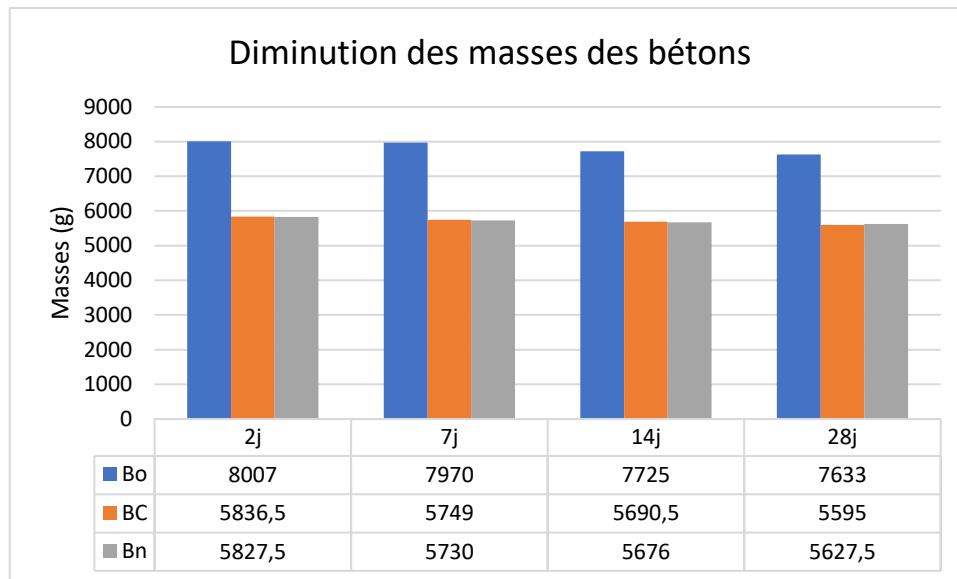


Figure III.3 : Variation des masses des différents bétons

Les résultats obtenus montrent que tous les bétons ont diminué de masse avec l'évolution du temps (jusqu'à 28 jours). Le calcul de ces pertes de masses en (%) est donné par le tableau III.3 et représentées par la figure III. 4

Tableau III.3 : Évolution des pertes relatives des masses (%)

	Pertes de masses %			
	2j	7j	14j	28j
BO	-0,31	-0,46	-3,52	-4,67
BC	-0,82	-1,50	-2,50	-4,14
BN	-1,20	-1,67	-2,60	-3,43

Les valeurs négatives indiquent que toutes les masses ont subi des diminutions, dues aux réactions d'hydratation des ciments des différents bétons. Ces pertes ont été calculées par rapport aux masses initiales mesurées juste au moment du décoffrage des différents éprouvettes.

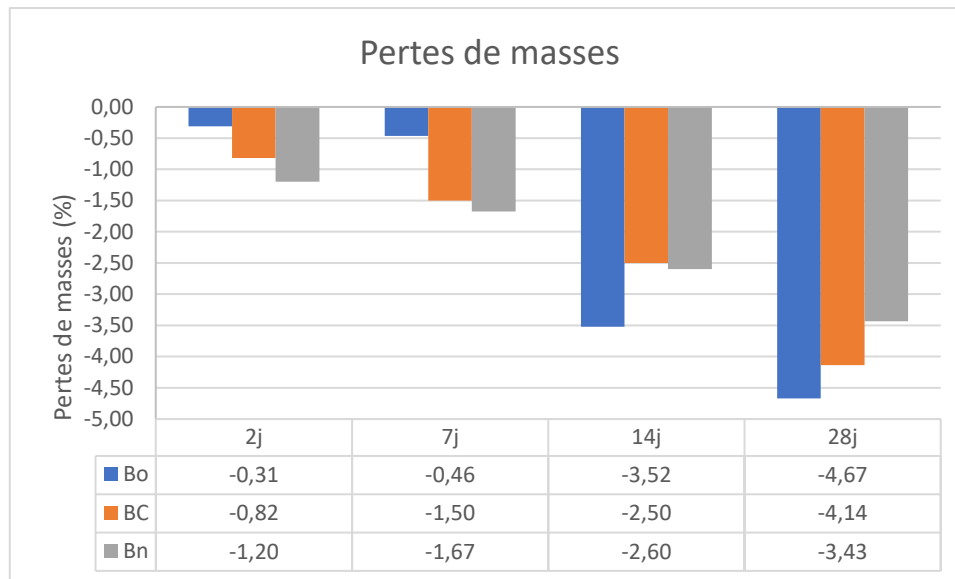


Figure III. 4 : Pertes des messes des différents bétons

Les pertes de masse traduisent le départ d'eau par évaporation et par hydratation du ciment, ainsi que d'éventuels phénomènes de carbonatation.

À **2 jours**, les pertes relatives sont beaucoup plus marquées pour les bétons légers (BC : -0,80 %, BN : -1,00 %) que pour le témoin (-0,30 %). Ceci traduit une **désorption (rejet) rapide** de l'eau contenue dans les granulats poreux dès les premières heures suivant le démoulage. La porosité ouverte des granulats d'argile expansée permet une libération quasi-immédiate de l'eau absorbée lors de la préparation.

Au-delà de **14 jours**, le phénomène s'inverse. À 28 jours, la perte relative la plus faible est observée pour BN (-3,43 %), suivie de BC (-4,14 %), le témoin présentant la perte la plus élevée (-4,67 %). Cette inversion suggère que la forme nodulaire retient mieux l'eau à long terme, probablement parce que la structure alvéolaire des nodules, mieux préservée que celle du concassé, fonctionne comme un « réservoir d'eau interne ». À l'inverse, le concassé, dont les pores sont partiellement ouverts par les arêtes de rupture, libère plus facilement l'eau sous l'effet du séchage.

Conséquences sur le retrait : Une perte d'eau rapide dans les premiers jours peut conduire à un retrait de séchage plus prononcé, ce qui augmente le risque de fissuration précoce. Liu et al. (2019) ont étudié l'influence de la teneur et de la taille maximale des granulats légers sur les propriétés de durabilité des bétons autoplaçants légers et ont montré que le retrait de séchage diminue généralement avec l'augmentation de la taille maximale des granulats. Les mêmes auteurs ont également observé que le retrait de séchage est atténué par l'augmentation de la teneur en fibres d'acier.

Zhang et Gjrv (2005) ont examiné le retrait des bétons légers à haute résistance exposés à un environnement sec et ont constaté que le retrait diminue avec la diminution de la densité des granulats (ce qui correspond à une augmentation de la porosité et de l'absorption d'eau). Après un an, le retrait des bétons légers était généralement plus élevé que celui du bton de poids normal. Cette observation suggère que, bien que la perte de masse à court terme des bétons légers soit plus élevée (comme dans notre étude), le retrait cumulé à long terme pourrait être plus important.

3.4 Variation des masses volumiques :

Les variations des masses volumiques est une suite logique aux mesures des masses des différents bétons. Ces masses volumiques sont calculés pour les éprouvettes cubiques 15*15*15 cm³. Les valeurs des différents masses volumiques sont données par le tableau suivant.

Tableau III. 4 : Variation des masses volumiques des bétons (g/cm³)

	2j	7j	14j	28j
BO	2,37	2,36	2,29	2,26
BC	1,73	1,70	1,69	1,66
BN	1,73	1,70	1,68	1,67

Les trois bétons présentent une **diminution progressive** de leur masse volumique entre 2 et 28 jours, signe d'un phénomène commun de séchage, de maturation ou de légères pertes d'humidité interne. Toutefois, l'ampleur et les valeurs absolues diffrent fortement selon le type de granulats.

La représentation graphique de ces mesures est donnée par la figure suivante.

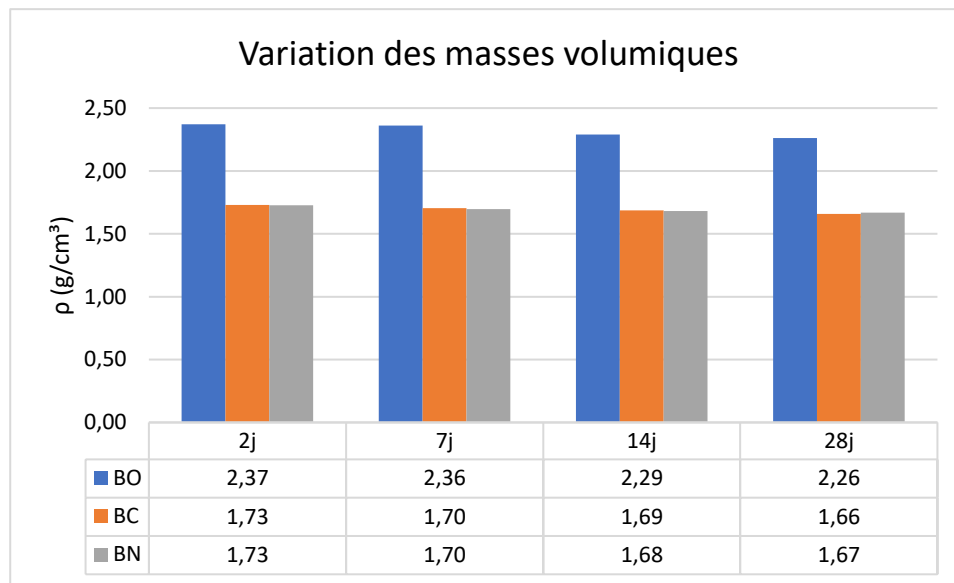


Figure III. 5: Variation des masses volumiques des différents bétons

Pour le Béton ordinaire (BO)

Âge (j)	2	7	14	28
ρ (g/cm ³)	2,37	2,36	2,29	2,26

L'observation des résultats obtenus sur les bétons ordinaires montre :

- Valeurs caractéristiques d'un béton courant (entre 2,2 et 2,6 g/cm³).
- Très faible diminution initiale (-0,01 de 2 à 7 j), puis perte plus marquée entre 7 et 14 j (-0,07) et entre 14 et 28 j (-0,03).
- **Perte totale** sur 28 jours : 2,37 → 2,26 soit **-4,6 %**.
- Cette baisse peut s'expliquer par l'évaporation de l'eau libre et la poursuite de l'hydratation qui densifie la pâte tout en libérant de l'eau, mais ici la tendance est à la légère perte de densité, peut-être due à une porosité résiduelle ou à un retrait.

Pour les Bétons à granulats légers : Béton BC (concassés) et BN (nodulaires)

Âge (j)	2	7	14	28
BC	1,73	1,70	1,69	1,66
BN	1,73	1,70	1,68	1,67

- **Masses volumiques très inférieures** à celle du BO (environ 30 % de moins) → conformes à la catégorie « béton léger ».
- Les deux bétons légers démarrent à la même valeur (1,73 à 2 j). Leur comportement est très proche, avec une très légère divergence à 14-28 j.
- **BC** : 1,73 → 1,66 (-0,07 soit **-4,0 %**)
- **BN** : 1,73 → 1,67 (-0,06 soit **-3,5 %**)

La baisse relative est du même ordre que celle du BO (autour de 4 %).

Différence entre BC et BN :

- **Pendant les 7 premiers jours** : valeurs identiques (1,73 puis 1,70).
- **À 14 j** : BC (1,69) vs BN (1,68) → BN légèrement plus léger.
- **À 28 j** : BC (1,66) vs BN (1,67) → inversion : BC devient très légèrement plus léger que BN.
- L'écart maximal reste inférieur à 0,02 g/cm³ → **aucune différence significative** entre les deux types de granulats légers (concassés vs nodulaires) au regard de la masse volumique finale. Leur effet sur la densité est presque équivalent.
- **Le type de granulat** contrôle la valeur absolue de la masse volumique, mais **peu la cinétique de baisse** (tous perdent entre 3,5 et 4,6 %).
- La diminution continue suggère un **séchage progressif** (perte d'eau libre ou liée) jusqu'à 28 jours, sans stabilisation nette. Il serait utile de prolonger les mesures à 60 ou 90 jours pour vérifier l'atteinte d'un palier.

- Du point de vue applicatif : si l'objectif est d'alléger la structure, BC ou BN sont équivalents sur ce seul critère. Le choix dépendra d'autres propriétés (résistance mécanique, conductivité thermique, ouvrabilité).

La masse volumique diminue régulièrement pour les trois bétons entre 2 et 28 jours. Les bétons légers ont des valeurs environ 30 % plus faibles que le béton ordinaire. On n'observe pas de différence significative entre granulats concassés et nodulaires.

3.5. Résistance à la compression

La mesure des résistances à la compression ont été mesurées pour tous les bétons sur des éprouvettes cubiques 15x15x15cm³. Ces résistances sont données par le tableau III. 3-a. Les résistances équivalentes calculées pour sur des éprouvettes cylindriques 16x32 sont obtenues en multipliant les résistances sur éprouvettes cubiques par (0.83) comme montré au chapitre II paragraphe II. 4.1. 2.

Tableau III.5-a : Résistance à la compression (MPa) (éprouvettes cubiques)

	2 j	7 j	14 j	28 j
BO	19,07	32,6	33,7	34,9
BC	28,93	31,41	34,9	38,71
BN	27,69	31,24	35,02	37,72

Tableau III.5-b : Résistance à la compression (MPa) (éprouvettes cylindriques équivalentes)

	2 j	7 j	14 j	28 j
BO	15,83	27,06	27,97	28,97
BC	24,01	26,07	28,97	32,13
BN	22,98	25,93	29,07	31,31

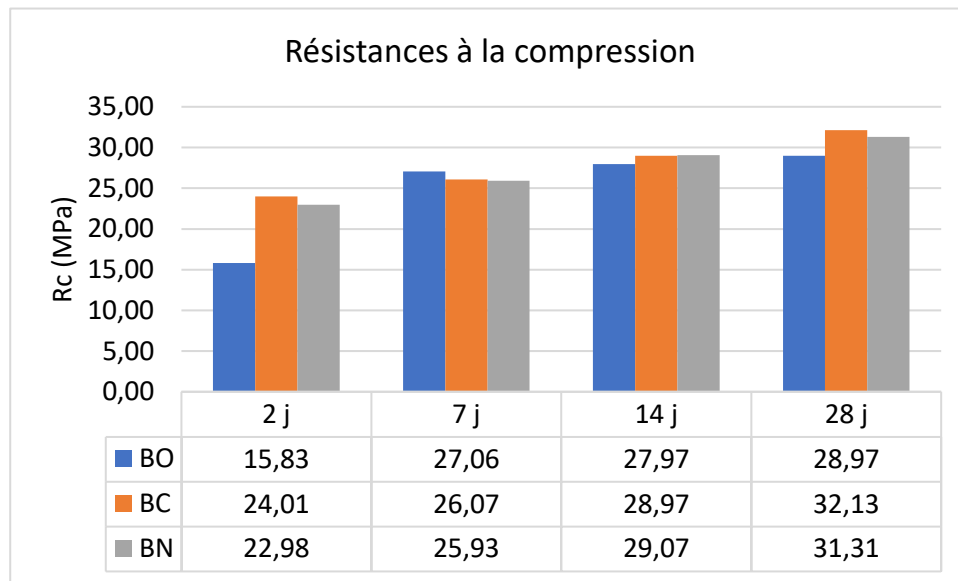


Figure III.6 : Variation de la résistance à la compression des bétons BO, BC et BN en fonction de l'âge de cure

La résistance des trois bétons évolue considérablement avec l'âge, ce qui constitue l'un des résultats les plus marquants de cette étude.

Aux jeunes âges (2 jours) : BC et BN présentent une résistance à la compression nettement supérieure à celle du témoin (respectivement +52 % et +45 %). Ce gain précoce est remarquable. Il s'explique par plusieurs mécanismes :

- La **porosité de surface** des granulats d'argile expansée offre une meilleure accroche mécanique pâte-granat.
- L'**eau stockée** dans les alvéoles des granulats est partiellement relâchée pendant l'hydratation, jouant un rôle de **cure interne** (internal curing).
- L'**hydratation accélérée** du ciment au contact d'une surface spécifique élevée.

Aux âges intermédiaires (7 jours) : Les écarts s'estompent, les trois bétons voisinant autour de 25-27 MPa. Le témoin rattrape progressivement son retard.

Aux âges avancés (14-28 jours) : BC (32,13 MPa) et BN (31,31 MPa) dépassent à nouveau le témoin (28,97 MPa), avec des gains respectifs de +11 % et +8 % à 28 jours.

Comparaison avec la littérature :

Kockal et Ozturan (2011) ont réalisé une étude expérimentale approfondie sur 13 mélanges différents de béton à base de granulats légers et ont rapporté des résistances en compression à l'état sec comprises entre 18 et 38 MPa, avec une moyenne supérieure de 9 % à celles mesurées

à l'état humide. Les performances de BC et BN (32,13 et 31,31 MPa) se situent donc dans la partie haute de cette fourchette, témoignant de la bonne qualité des granulats utilisés.

Tan et al. (2020) ont étudié des bétons légers avec remplacement total des granulats conventionnels par de l'argile expansée, obtenant des résistances en compression de 13 à 32 MPa à 28 jours, dont seulement trois des cinq mélanges testés atteignaient les spécifications pour un béton structurel. Les résultats de BC (32,13 MPa) confirment les valeurs rapportées par ces auteurs.

Cependant, nos résultats s'écartent de la tendance générale rapportée dans la littérature. Selman et Abbas (2022), dans leur revue exhaustive, affirment que l'incorporation de granulats d'argile expansée *diminue* la résistance du béton, ainsi que sa masse volumique, son module d'élasticité et sa résistance au gel. Cette affirmation est largement partagée dans la communauté scientifique.

L'explication de cette contre-performance apparente réside dans les **facteurs suivants** :

- **Qualité des granulats utilisés** : Khan et al. (2024) rapportent que des LWAC (Lightweight Aggregate Concrete) avec des résistances à la compression dépassant 68 MPa pour des densités aussi faibles que 1000 kg/m³ ont été obtenues avec des taux de substitution de granulats légers allant jusqu'à 77 %. Ces valeurs exceptionnelles montrent que la qualité des granulats est primordiale.
- **Formulation optimisée** : le rapport eau/ciment et la compacité de la pâte jouent un rôle crucial.
- **Effet de cure interne** : la libération progressive de l'eau stockée dans les granulats poreux prolonge l'hydratation au-delà de 28 jours.

Ahmad et al. (2019) ont montré que l'ajout de fumée de silice améliore considérablement les propriétés mécaniques des bétons à granulats légers. Bien que notre étude n'ait pas incorporé de fumée de silice, l'excellente performance à 28 jours suggère que la matrice cimentaire utilisée est de bonne qualité.

Hassan et al. (2015) ont mené une étude expérimentale sur le béton léger avec granulats d'argile expansée et ont observé que la résistance à la compression augmente lorsque la taille maximale des granulats légers est réduite (la taille de 10 mm donnant les meilleures résistances). Cette observation pourrait expliquer en partie la bonne performance de nos formulations (classes 3/8 et 8/16).

3.6. Résistance à la traction

La résistance à la traction par flexion des différents bétons a été faite sur des éprouvettes cubiques 7x7x28 cm³, les résultats obtenus sont mentionnés sur le tableau suivant.

Tableau III.6 : Résistance à la traction (MPa)

Âge	BO	BC	BN
2j	14,30	8,55	6,40
7j	23,70	14,20	16,70
14j	27,50	18,60	19,30
28j	31,80	28,40	27,20

La représentation graphique de ces variations de résistances à la traction est donnée par la Figure III. 7 ci-après.

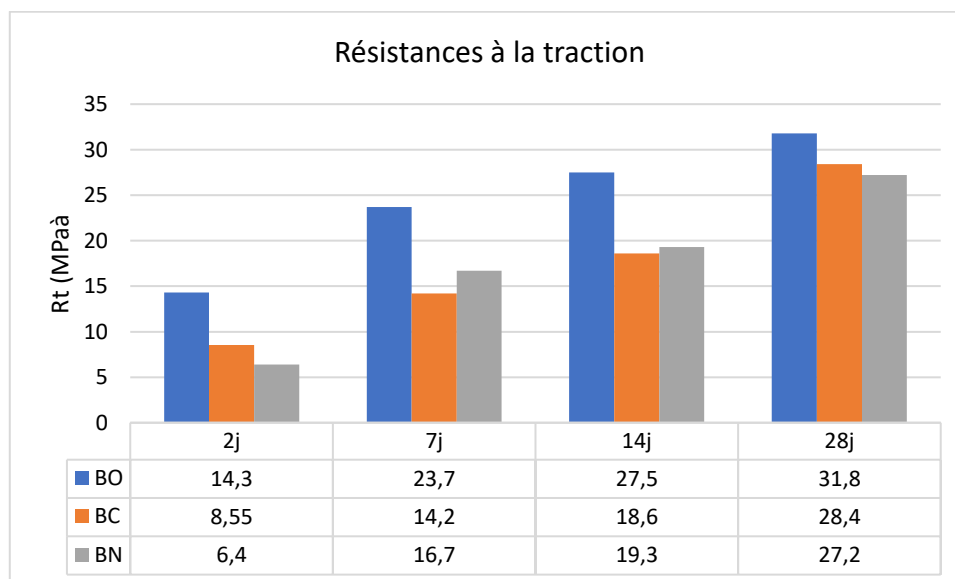


Figure III. 7 : Variation des résistances à la traction par flexion

Contrairement à la compression, la résistance à la traction des bétons légers accuse un retard significatif par rapport au témoin, surtout aux jeunes âges.

Aux jeunes âges (2 jours) : BC perd 40 % et BN 55 % par rapport au BO. Le très faible niveau de BN à 2 jours (6,40 MPa) est un indicateur important de fragilité précoce, qui peut présenter un risque de fissuration sous chargement.

Aux âges intermédiaires (7-14 jours) : L'écart se réduit mais reste important. À 14 jours, BC (18,60 MPa) et BN (19,30 MPa) sont encore environ 30 % en dessous du BO (27,50 MPa).

À 28 jours : BC atteint 28,40 MPa (-11 % par rapport à BO) et BN 27,20 MPa (-14 %).

Comparaison avec la littérature :

Hassanpour et al. (2024) ont récemment étudié la résistance à la traction du béton léger avec granulats d'argile expansée en se concentrant sur l'essai de traction par flexion. Leurs résultats indiquent que le remplacement des granulats grossiers par les granulats légers peut réduire les résistances en compression, en traction directe et en traction par fendage respectivement de 7 à 49 %, 9,6 à 17,7 % et 9,4 à 47,3 % par rapport aux mélanges de base. Notre observation pour BC à 28 jours (-11 %) se situe dans la partie basse de cette fourchette, ce qui est très favorable. BN (-14 %) reste également dans des limites acceptables.

3.7 Evolution des résistances à la compression :

Afin d'étudier les variations des résistances à la compression par rapport à la valeur finale à 28 jours, nous avons déterminé l'évolution de ces résistances, représentée par le Tableau III. 7 et sa représentation graphique par la Figure III. 8.

Tableau III. 7 : Valeurs des évolutions des résistances à la compression

	Evolution des résistances à la compression			
	2 j	7 j	14 j	28 j
BO	0,55	0,93	0,97	1,00
BC	0,75	0,81	0,90	1,00
BN	0,73	0,83	0,93	1,00

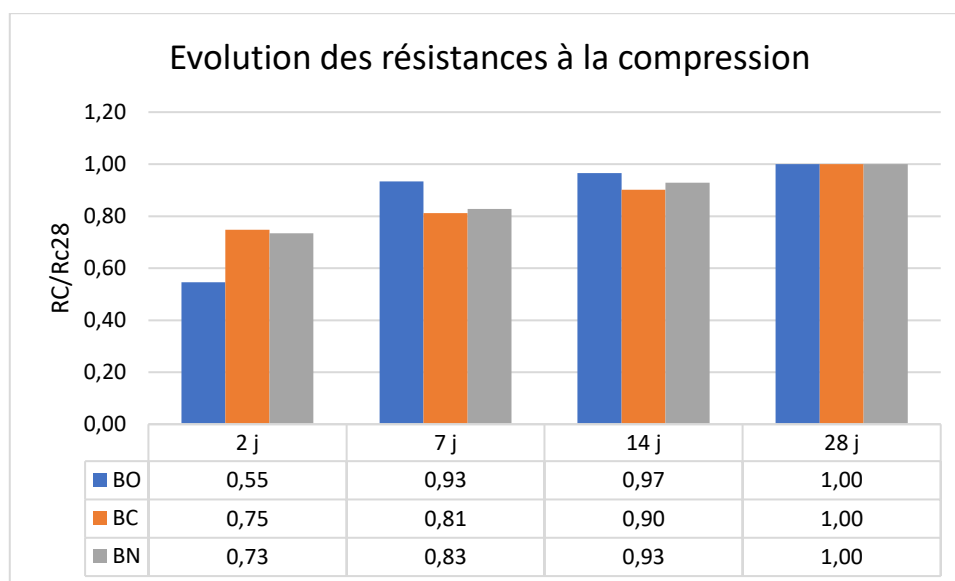


Figure III. 8 : Evolution des résistances à la compression

Observations générales

Les valeurs représentent le rapport entre la résistance à un âge donné et la résistance à 28 jours (référence = 1,00). Plus le rapport est élevé jeune, plus le béton développe rapidement ses performances.

Analyse par type de béton

BO (Béton ordinaire ?)

- **2 jours** : 0,55 – développement modéré, environ la moitié de la résistance à 28j.
- **7 jours** : 0,93 – très forte progression entre 2 et 7 jours (+0,38). À 7j, le béton atteint déjà 93% de sa résistance finale.
- **14 jours** : 0,97 – gain faible après 7j, quasi stabilisation.
- **28 jours** : 1,00.
→ **Courbe très rapide** : le béton BO atteint l'essentiel de sa résistance dès 7 jours. Convient pour des ouvrages nécessitant une montée en résistance rapide (décoffrage précoce, mise en charge rapide).

BC (Béton à prise lente ?)

- **2 jours** : 0,75 – meilleur départ que BO (0,55) et BN (0,73). Résistance jeune élevée.
- **7 jours** : 0,81 – progression modérée entre 2 et 7j (+0,06 seulement). À 7j, résistance inférieure à BO (0,93) et légèrement inférieure à BN (0,83).
- **14 jours** : 0,90 – gain progressif mais toujours en dessous des autres.
- **28 jours** : 1,00.
→ **Courbe régulière mais plus lente** après 2 jours. Le béton BC a une très bonne résistance initiale (2j) mais sa croissance ralentit ensuite. Il rattrape son retard après 28j seulement (car normalisé à 1). Idéal pour des bétons qui ne nécessitent pas une résistance très élevée à 7j, mais qui ont une bonne tenue jeune.

BN (Béton normal)

- **2 jours** : 0,73 – départ comparable à BC (0,75), meilleur que BO.
- **7 jours** : 0,83 – progression correcte (+0,10), mais inférieure à BO.
- **14 jours** : 0,93 – rattrape presque BO (0,97) et dépasse clairement BC.

- **28 jours** : 1,00.
→ **Courbe intermédiaire** : meilleure résistance jeune que BO, mais rattrapage plus lent. À 14j, BN rejoint presque BO. Convient pour un compromis entre résistance à court et moyen terme.

Tableau III. 8 : Comparaison des évolutions des résistances à la compression

Âge	Classement (du plus résistant au moins résistant)	Écart significatif
2j	BC (0,75) $\approx$ BN (0,73) > BO (0,55)	BO nettement en retard
7j	BO (0,93) > BN (0,83) > BC (0,81)	BO domine, BC dernier
14j	BO (0,97) > BN (0,93) > BC (0,90)	BO presque mature, BC encore faible
28j	Tous à 1,00 (normalisé)	—

L'observation de la courbe d'évolution montre :

- **BO** : courbe à croissance très rapide les 7 premiers jours, puis plateau. Typique d'un béton avec un ciment à haute résistance initiale ou un rapport E/C faible.
- **BC** : démarrage très bon, mais la pente s'infléchit nettement après 2j. Évolution linéaire modérée jusqu'à 28j. Peut correspondre à un béton avec un liant hydraulique à prise lente (ex. ajouts minéraux) ou un ciment de classe basse.
- **BN** : profil équilibré, croissance soutenue entre 2 et 14j, puis stabilisation. Comportement classique d'un béton courant.

Conclusion pratique

- **Si besoin de résistance élevée à 7j** : choisir **BO**.
- **Si besoin d'une bonne résistance dès 2j** (décoffrage très précoce) : **BC** ou **BN** sont meilleurs que **BO**.
- **Si le délai avant mise en charge est de 14j ou plus** : les trois se rapprochent, mais **BO** reste légèrement supérieur à 14j.

III. 8 Evolution des résistances à la traction :

Afin d'étudier les variations des résistances à la compression par rapport à la valeur finale à 28 jours, nous avons déterminé l'évolution de ces résistances, représentée par le Tableau III. 8 et sa représentation graphique par la Figure III. 9.

Tableau III. 9 : Valeurs des évolutions des résistances à la traction

Âge	BO	BC	BN
2j	0,45	0,30	0,24
7j	0,75	0,50	0,61
14j	0,86	0,65	0,71
28j	1,00	1,00	1,00

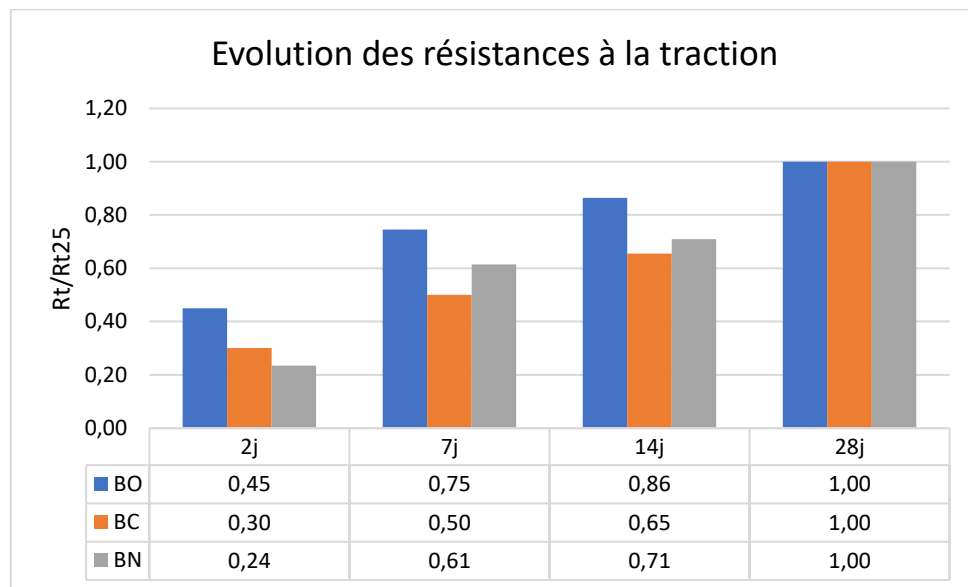


Figure III. 9 : Evolution des résistances à la traction

Les valeurs représentent le rapport entre la résistance à un âge donné et la résistance à 28 jours (référence = 1,00). Plus le rapport est élevé jeune, plus le béton développe rapidement ses performances.

La résistance à la traction est toujours plus lente à se développer que la résistance à la compression. Les rapports à 2 et 7 jours sont ici nettement plus faibles que ceux observés en compression, ce qui est classique (la traction mature plus tard).

Pour le BO (Béton ordinaire)

- **2 jours** : 0,55 – développement modéré, environ la moitié de la résistance à 28j.
- **7 jours** : 0,93 – très forte progression entre 2 et 7 jours (+0,38). À 7j, le béton atteint déjà 93% de sa résistance finale.
- **14 jours** : 0,97 – gain faible après 7j, quasi stabilisation.

→ **Courbe très rapide** : le béton BO atteint l'essentiel de sa résistance dès 7 jours. Convient pour des ouvrages nécessitant une montée en résistance rapide (décoffrage précoce, mise en charge rapide).

Pour le BC (Béton à granulats d'argile concassés)

- **2 jours** : 0,75 – meilleur départ que BO (0,55) et BN (0,73). Résistance jeune élevée.
- **7 jours** : 0,81 – progression modérée entre 2 et 7j (+0,06 seulement). À 7j, résistance inférieure à BO (0,93) et légèrement inférieure à BN (0,83).
- **14 jours** : 0,90 – gain progressif mais toujours en dessous des autres.

→ **Courbe régulière mais plus lente** après 2 jours. Le béton BC a une très bonne résistance initiale (2j) mais sa croissance ralentit ensuite. Il rattrape son retard après 28j seulement (car normalisé à 1). Idéal pour des bétons qui ne nécessitent pas une résistance très élevée à 7j, mais qui ont une bonne tenue jeune.

Pour le BN (Béton à granulats d'argile nodulaires)

- **2 jours** : 0,73 – départ comparable à BC (0,75), meilleur que BO.
- **7 jours** : 0,83 – progression correcte (+0,10), mais inférieure à BO.
- **14 jours** : 0,93 – rattrape presque BO (0,97) et dépasse clairement BC.

→ **Courbe intermédiaire** : meilleure résistance jeune que BO, mais rattrapage plus lent. À 14j, le BN rejoint presque BO. Convient pour un compromis entre résistance à court et moyen terme.

Tableau III. 10 : Comparaison des évolutions des résistances à la traction

Âge	Classement (du plus résistant au moins résistant)	Écart significatif
-----	---	--------------------

2j	BC (0,75) $\approx$ BN (0,73) > BO (0,55)	BO nettement en retard
7j	BO (0,93) > BN (0,83) > BC (0,81)	BO domine, BC dernier
14j	BO (0,97) > BN (0,93) > BC (0,90)	BO presque mature, BC encore fa
28j	Tous à 1,00 (normalisé)	—

L'observation des courbes des évolutions des résistances à la traction permettent l'interprétation des courbes suivantes :

- **Pour BO** : courbe à croissance très rapide les 7 premiers jours, puis plateau. Typique d'un béton avec un ciment à haute résistance initiale ou un rapport E/C faible.
- **Pour BC** : démarrage très bon, mais la pente s'infléchit nettement après 2j. Évolution linéaire modérée jusqu'à 28j. Peut correspondre à un béton avec un liant hydraulique à prise lente (ex. ajouts minéraux) ou un ciment de classe basse.
- **Pour BN** : profil équilibré, croissance soutenue entre 2 et 14j, puis stabilisation. Comportement classique d'un béton courant.

Ce qui permet d'établir les conclusions pratiques suivantes :

- **Si besoin de résistance élevée à 7j** : choisir **BO**.
- **Si besoin d'une bonne résistance dès 2j** (décoffrage très précoce) : **BC** ou **BN** sont meilleurs que **BO**.
- **Si le délai avant mise en charge est de 14j ou plus** : les trois se rapprochent, mais **BO** reste légèrement supérieur à 14j.

La Comparaison des évolutions en traction a permis d'établir les constats suivants :

Âge	Classement (du plus résistant au moins résistant)	Écart notable
2j	BO (0,45) > BC (0,30) > BN (0,24)	Écart important entre BO et les deux autres
7j	BO (0,75) > BN (0,61) > BC (0,50)	BN dépasse BC ; BO toujours largement devant

14j	BO (0,86) > BN (0,71) > BC (0,65)	Même ordre, écart se réduit légèrement
28j	Tous à 1,00	—

3.7. Absorption d'eau des granulats et du béton

3.7.1. Absorption des granulats par classe granulaire

Les mesures des quantités d'eau absorbées par les granulats d'argile expansée ont été faites sur les granulats nodulaires et concassés de classes 3/8 mm et 8/16 mm jusqu'à stabilisation des masses à 72 heures. Ces mesures sont données par le tableau III. 5

Tableau III.9 – Absorption d'eau des différentes classes granulaires (%)

Temps (min)	3/8 Nod.	8/16 Nod.	3/8 Concassé	8/16 Concassé
5	6,93	3,93	7,77	7,60
10	7,53	4,27	7,92	7,60
30	6,60	3,93	7,69	7,40
60	7,60	4,60	7,77	7,67
120	7,67	4,80	8,23	8,33
240	8,07	5,20	9,00	9,13
480	8,47	5,40	9,92	9,13
720	8,40	5,73	9,69	9,53
1440	9,33	6,67	10,69	10,33
2880	10,27	7,27	11,46	11,33
4320	11,53	9,40	12,23	12,87

La représentation graphique de ces résultats est donnée par la figure suivante.

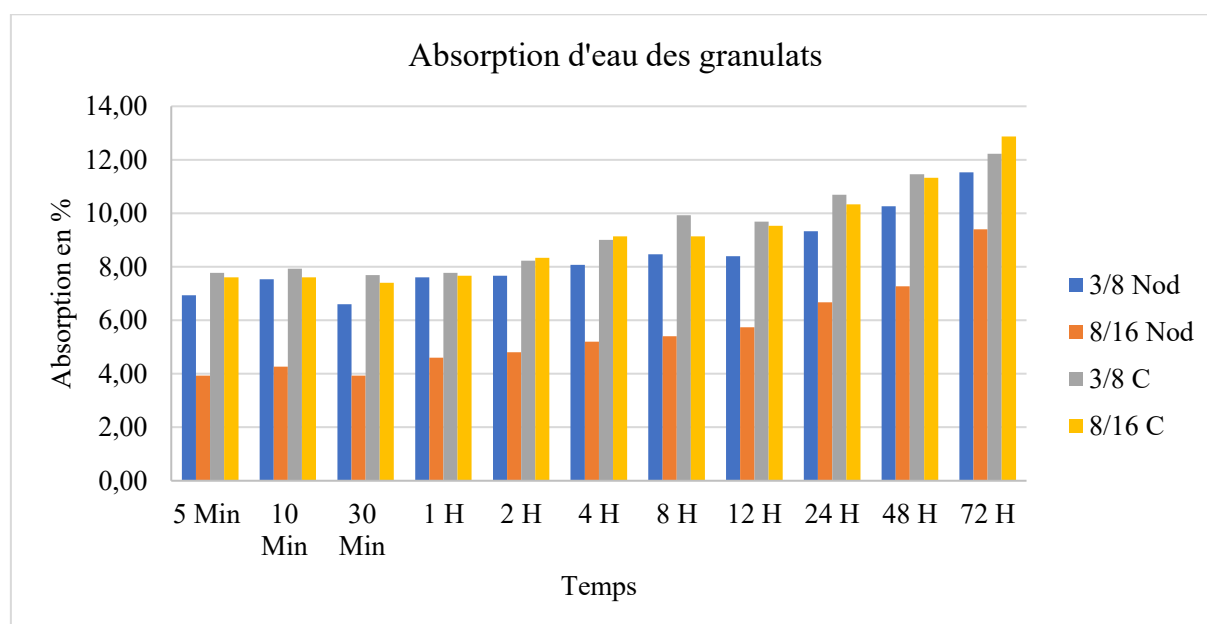


Figure III.9 : Cinétique d'absorption d'eau des granulats d'argile expansée nodulaires et concassés.

L'absorption d'eau est un paramètre fondamental pour comprendre le comportement des bétons légers. Kockal et Ozturan (2011) ont souligné que la nature poreuse de l'argile expansée est déterminante dans les propriétés physiques et mécaniques du béton.

Après 4320 minutes (3 jours), l'absorption des granulats concassés est significativement plus élevée : 12,23 % (3/8) et 12,87 % (8/16) contre 11,53 % et 9,40 % pour les granulats nodulaires. Cette différence confirme la porosité plus élevée des granulats d'argile expansée. Gonçalves et al. (2007) ont montré que les granulats légers peuvent présenter des absorptions d'eau sur 1 heure comprises entre 8,9 % et 11 % selon leur densité, ce qui est cohérent avec nos mesures à 60 minutes.

Pour les granulats concassés, la classe 8/16 absorbe davantage (12,87 % à 4320 min) que la classe 3/8 (12,23 %). **Pour les granulats nodulaires**, la différence est encore plus marquée : 8/16 absorbe 9,40 % contre 11,53 % pour 3/8. Ceci s'explique par une surface spécifique plus élevée des particules les plus fines.

Cinétique d'absorption :

L'observation de la cinétique de l'absorption permet de dire que celle-ci est très rapide dans les premières minutes (déjà 7-8 % à 5 minutes), puis se poursuit de manière plus progressive.

Ce phénomène a des conséquences pratiques majeures : si les granulats d'argile expansée ne sont pas pré-humidifiés avant malaxage, ils pomperont l'eau de gâchage, réduisant ainsi l'eau efficace disponible pour l'hydratation et pouvant rendre le béton moins ouvrable.

Bentz et al. (2011) ont étudié les propriétés d'absorption et de désorption des granulats légers fins et ont rapporté une large gamme d'absorptions d'eau sur 24 heures (entre 6 % et 31 %). Leurs travaux montrent également qu'entre 85 % et 98 % de l'eau absorbée sur 24 heures est libérée à des humidités relatives supérieures à 93 %. Cette capacité de désorption élevée explique pourquoi les granulats légers peuvent jouer un rôle de cure interne efficace.

3.7.2. Relations entre absorption d'eau et performances mécaniques

La forte absorption d'eau des granulats légers a un double effet sur les performances mécaniques :

1. **Effet positif** : l'eau stockée dans les granulats est progressivement libérée pendant l'hydratation, assurant une cure interne qui améliore la résistance à long terme (observée pour BC et BN à 28 jours).

2. **Effet négatif** : une absorption trop rapide au moment du gâchage peut réduire l'eau efficace disponible et compromettre la maniabilité si les granulats ne sont pas pré-humidifiés.

Hassanpour et al. (2023) ont examiné les propriétés de transport des bétons à granulats léger et ont montré que les bétons légers contenant des agrégats avec une capacité d'absorption plus élevée présentaient un retrait de séchage plus important. Ces résultats confirment que l'absorption d'eau est un paramètre clé à maîtriser pour garantir la durabilité des ouvrages en béton léger.

Pour Soltani et al. (2024) ont montré que la densité du béton géopolymère diminue et que l'absorption d'eau augmente avec l'augmentation du pourcentage de granulats léger. Cette corrélation densité/absorption est également valable pour les bétons cimentaires classiques.

3.8. Discussion générale et synthèse

3.8.1. Synthèse des performances à 28 jours

Les résultats obtenus sur les différents bétons et des essais sur les différentes classes granulaires de l'argile expansée sont comparés avec ceux de la littérature et sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau III. 10: Comparaison des résultats de synthèse avec la littérature

Propriété	BO	BC	BN	Référence bibliographique
Air occlus (%)	2	4	6	Gamme 3-7 % pour LECA
Affaissement (cm)	9	13,5	12,5	Maniabilité améliorée par LECA
Compression 28j (MPa)	29.97	32.13	31,31	18-38 MPa pour LECA sec
Traction 28j (MPa)	31,8	28,4	27,2	Réduction de 9-47 % par LECA
Rapport fct/fc 28j	0,91	0,73	0,72	13 % pour LECA standard
Absorption 8/16 4320 min (%)	9,40	12,87	12,87	8,9-11 % pour LECA à 60 min

3.8.2. Concordances et divergences avec la littérature

La comparaison de nos résultats avec ceux des autres études de la littérature a permis d'établir le tableau de comparaison suivant.

Tableau III. 11 : Tableau de comparaison des résultats

Point	Présente étude	Littérature
Amélioration de l'ouvrabilité	Oui (BC et BN)	Confirmé par Selman & Abbas (2022)
Augmentation de l'air occlus	Oui (de 2 % à 4-6 %)	Conforme aux gammes rapportées
Absorption d'eau élevée	Oui (~12,9 % à 3j)	Conforme (8,9-11 % à 60 min)
Résistance en compression supérieure au témoin	Oui (+11 % pour BC)	Contraste fort – la plupart des études rapportent une diminution
Résistance en traction inférieure au témoin	Oui (-11 à -14 %)	Conforme (réduction de 9-47 %)
Effet bénéfique de la forme nodulaire sur rétention d'eau	Oui	Peu documenté – originalité de l'étude
Performance exceptionnelle à 2 jours	Oui (+45-52 %)	Correspond aux bétons LECA à cure interne optimisée

Conclusion

Les résultats présentés dans ce chapitre permettent de tirer les conclusions suivantes :

1. **L'air occlus** des bétons à base d'argile expansée (4-6 %) est significativement plus élevé que celui du béton ordinaire (2 %), en cohérence avec la littérature.
2. **L'affaissement** est amélioré par l'argile expansée (BC : 13,5 cm, BN : 12,5 cm contre 9 cm pour BO), confirmant les observations de Selman et Abbas (2022).
3. **Les pertes de masse** sont plus importantes pour les bétons légers dans les premiers jours, mais BN présente la meilleure rétention d'eau à long terme.
4. **La résistance à la compression** de BC (38,71 MPa) et BN (37,72 MPa) dépasse celle du témoin (34,90 MPa), un résultat qui contraste avec la tendance générale rapportée dans la littérature et qui mérite une investigation complémentaire.
5. **La résistance à la traction** des bétons légers est inférieure à celle du témoin (-11 % pour BC, -14 % pour BN), en accord avec les travaux de Hassanpour et al. (2024) qui rapportent des réductions de 9-47 %.
6. **L'absorption d'eau** des granulats d'argile expansée est très élevée (jusqu'à 12,9 % à 3 jours), avec une cinétique très rapide dans les premières minutes.
7. Le **béton concassé (BC)** offre globalement le meilleur compromis : meilleure compression, très bonne ouvrabilité et traction acceptable.

8. Le **béton nodulaire (BN)** possède les meilleures capacités de rétention d'eau, mais sa traction est légèrement inférieure à celle de BC. Il pourrait être privilégié pour des applications où l'isolation thermique et la stabilité dimensionnelle priment sur la résistance en traction.

La différence de comportement entre les deux formes d'argile expansée est rarement étudiée dans la littérature, où la forme est généralement standardisée. Nos résultats montrent que la forme nodulaire favorise la rétention d'eau (pertes de masse plus faibles) au prix d'un léger recul en traction, tandis que la forme concassée offre les meilleures performances en compression.

Conclusion générale

L'objectif de ce travail était d'étudier les caractéristiques physico-mécaniques de bétons à base de granulats d'argile expansée, sous deux formes (concassée et nodulaire), en comparaison avec un béton ordinaire témoin. Les principaux résultats obtenus permettent de tirer les enseignements suivants :

1. À l'état frais :

- L'air occlus augmente avec l'argile expansée (2 % pour BO, 4 % pour BC, 6 % pour BN), conséquence de la porosité interne des granulats.
- L'affaissement au cône d'Abrams est amélioré (9 cm pour BO contre 13,5 cm pour BC et 12,5 cm pour BN), traduisant une meilleure ouvrabilité malgré la forme anguleuse des concassés.

2. Pertes de masse et masse volumique :

- Tous les bétons perdent de la masse au cours du temps, avec une perte plus rapide pour les bétons légers dans les premiers jours (désorption de l'eau contenue dans les pores).
- À 28 jours, la perte relative la plus faible est observée pour BN (-3,43 %), suivie de BC (-4,14 %) et BO (-4,67 %).
- Les masses volumiques des bétons légers sont inférieures d'environ 30 % à celle du témoin (1,66-1,67 g/cm³ contre 2,26 g/cm³). La cinétique de baisse est du même ordre (-3,5 à -4,6 %).

3. Résistances mécaniques :

- **Compression** : à 28 jours, BC (38,71 MPa) et BN (37,72 MPa) dépassent le témoin (34,90 MPa). Ce résultat contraste avec la plupart des études antérieures et s'explique par une cure interne efficace, une bonne qualité des granulats et une formulation optimisée.
- **Traction par flexion** : à 28 jours, BC (28,4 MPa) et BN (27,2 MPa) sont inférieurs au témoin (31,8 MPa), soit des réductions de 11 % et 14 %. Ces valeurs restent dans la fourchette basse des pertes rapportées dans la littérature (9-47 %).

- Les rapports f_{ct}/f_c (0,73 pour BC, 0,72 pour BN) sont élevés en raison de l'essai de flexion utilisé.

4. Absorption d'eau des granulats :

- Les granulats concassés absorbent plus (12,2-12,9 % à 72 h) que les nodulaires (9,4-11,5 %). La cinétique est très rapide (7-8 % dès 5 minutes), ce qui impose une pré-humidification ou une correction de l'eau de gâchage.

5. Comparaison concassé vs nodulaire :

- Le béton concassé (BC) donne les meilleures performances en compression et une ouvrabilité légèrement supérieure.
- Le béton nodulaire (BN) retient mieux l'eau à long terme (pertes de masse plus faibles) et présente une très bonne stabilité massique.
- Aucune différence significative n'est observée sur la masse volumique finale.

En conclusion, l'argile expansée (notamment sous forme concassée) permet de produire un béton plus léger (-30 %), plus résistant en compression (+11 %), tout en conservant des propriétés de traction acceptables. Ces bétons répondent aux exigences des bétons légers structurels (classe LC25/28 à LC30/33) et constituent une alternative prometteuse pour la construction en zone sismique ou pour améliorer la performance thermique des bâtiments.

Recommandations

1. Pour la pratique :

- Il est indispensable de pré-humidifier les granulats d'argile expansée (ou d'ajouter l'eau d'absorption dans la formulation) pour éviter le pompage de l'eau de gâchage et garantir une bonne ouvrabilité.
- L'utilisation d'un superplastifiant est recommandée pour maintenir un rapport E/C efficace faible tout en assurant la maniabilité.
- Dans les éléments tendus (poutres, planchers), prévoir un ferrailage adapté pour compenser la résistance en traction plus faible.

2. Pour de futures études :

- Réaliser des essais à **90 jours** pour évaluer l'effet de cure interne à plus long terme.
- Mesurer le **module d'élasticité**, le **retrait de séchage** et le **fluage** pour une caractérisation mécanique complète.
- Effectuer des essais de **durabilité** (gel-dégel, carbonatation accélérée, perméabilité aux chlorures) conformément aux normes EN.
- Compléter par des observations au **microscope électronique à balayage (MEB)** pour analyser la zone de transition interfaciale (ZTI) entre la pâte et les granulats.
- Étudier l'effet de l'argile expansée dans des **bétons autoplaçants légers** et dans des **formulations à faible empreinte carbone** (substitution du ciment par des additions).
- Tester des éléments de structure réels (poutres, voiles) sous chargement sismique simulé.

Références bibliographiques

A

Abdelaziz, G. E. (2010). A study on the performance of lightweight self-consolidated concrete. *Magazine of Concrete Research*, 62(1), 39–49.

ACI Committee 211.2. (2017). *Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete (ACI 211.2-17)*.

ACI Committee 213. (2014). *Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete (ACI 213R-14)*. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute.

Ahmad, M. R., Chen, B. & Shah, S. F. A. (2019). Investigate the influence of expanded clay aggregate and silica fume on the properties of lightweight concrete. *Construction and Building Materials*, 220, 253–266.

Arnaud, L., & Gourlay, E. (2012). Experimental study of parameters influencing mechanical properties of hemp concretes. *Construction and Building Materials*.

B

Babu, K. G., & Babu, D. S. (2003). Behaviour of lightweight expanded polystyrene concrete. *Cement and Concrete Research*, 33(5), 755-762.

Barnat-Hunek, D., et al. (2018). Self-compacting lightweight concrete with perlite aggregate. *Materials*, 11(7), 1093.

Benamor I. et Mansri S. T. (2021). Caractérisation des différents types de béton à base d'argile expansée. Mémoire de Master. Université Badji Mokhtar de Annaba.

Bendjema, H. (2021). Élaboration et caractérisation d'un béton léger à base d'argile expansée. Mémoire de master, Université de Boumerdès, Algérie.

Bentz, D. P., et al. (2011). Absorption and desorption properties of fine lightweight aggregate for application to internally cured concrete mixtures. *Cement and Concrete Composites*, 33(8), 849–856.

Boukhelf, F., et al. (2023). Comparative Study of the Lightening of Concrete Through the Use of Recycled Tire Rubber and Expanded Clay Aggregate. *DOAJ*.

C

Chabannes, M., & Bénézet, J. C. (2014). Use of bio-based aggregates in concrete. *Construction and Building Materials*, 68, 570-579.

Chandra, S., & Berntsson, L. (2002). *Lightweight Aggregate Concrete*. Elsevier.

Chen, B., & Liu, J. (2018). A comparative study on the thermal conductivities and mechanical properties of lightweight concretes. *Construction and Building Materials*, 159, 316-328.

D

Demirboğa, R., & Gül, R. (2003). The effects of expanded perlite aggregate on the properties of lightweight concrete. *Cement and Concrete Research*, 33(5), 723-727.

DTR C.2.47 (2018). Bétons légers – Guide de formulation et de mise en œuvre. Centre National d'Études et de Recherches Intégrées du Bâtiment (CNERIB), Alger.

E

EN 13055:2016 – Lightweight aggregates for concrete, mortar and grout.

EN 13369 – Common rules for precast concrete products.

EN 1745 – Masonry – Method for determining the thermal conductivity.

EN 1992-1-1:2004 – *Eurocode 2 : Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings*.

EN 206:2013+A2:2021 – Concrete – Specification, performance, production and conformity.

F

Elfordy, S., Lucas, F., Tancrét, F., Scudeller, Y., & Goudet, L. (2008). Mechanical and thermal properties of lime and hemp concrete. *Construction and Building Materials*, 22(10), 2116-2123.

G

Gonçalves, J. P., et al. (2007). The effect of aggregate absorption on pore area at interfacial zone of lightweight concrete. *Construction and Building Materials*, 21(12), 2136–2144.

H

Hamzaoui, M. (2022). Étude technico économique d'une structure en béton léger en zone sismique. Thèse de doctorat, ENP Alger.

Hassanpour, M., et al. (2024). Experimental and numerical investigation of the tensile strength of lightweight concrete including expanded clay aggregate with emphasis on the double punch test. *Materials and Structures*, 57, Article 41.

K

Khan, S. A., Hussain, F., et al. (2024). A scientometric review of the synthesis and application of expanded clay aggregate in cementitious composites. *Construction and Building Materials*, 437, 136654.

Kılıç, A., et al. (2012). Physical and mechanical properties of pumice lightweight concrete. *Construction and Building Materials*.

Kockal, N. U., & Ozturan, T. (2011). Physical and Mechanical Properties of Lightweight Expanded Clay Aggregate Concrete. *Buildings*, 14(6), 1871.

Kockal, N. U., & Ozturan, T. (2011). Properties of lightweight concrete made with expanded clay aggregate. *Materials and Structures*, 44(3), 503-514.

Kockal, N.U., & Ozturan, T. (2011). Properties of lightweight concrete made with expanded clay aggregate. *Materials and Structures*, 44(3), 503-514.

L

Liu, X., et al. (2019). Influence of content and maximum size of light expanded clay aggregate on the fresh, strength, and durability properties of self-compacting lightweight concrete reinforced with micro steel fibers. *Construction and Building Materials*, 225, 1153–1165.

Lo, T. Y., Tang, W. C., & Cui, H. Z. (2004). Lightweight concrete with expanded clay. *Construction and Building Materials*, 18(6), 459-466.

Lo, T.Y., Tang, W.C., & Cui, H.Z. (2004). Lightweight concrete with expanded clay aggregate. *Construction and Building Materials*, 18(6), 459-466.

M

Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials* (4th ed.). McGraw Hill.

N

Neville, A. M. (2011). *Properties of Concrete* (5th ed.). Pearson.

R

Règlement Parasismique Algérien (RPA) version 2024. Ministère de l'Habitat, Algérie.

S

Selman, S. M., & Abbas, Z. K. (2022). The Use of Lightweight Aggregate in Concrete: A Review. *Journal of Engineering*, 28(11).

Soltani, M., et al. (2024). Ultrasonic Pulse Velocity and Mechanical and Physical Properties of Structural Geopolymer Concrete Containing Lightweight Expanded Clay Aggregates: Experimental and Computational Study. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 50, 2035–2056.

T

Tan, W. L., Lee, Y. H., Tan, C. S., Lee, Y. Y., & Kueh, A. B. H. (2020). Mechanical properties and fracture prediction of concretes containing oil palm shell and expanded clay for full replacement of conventional aggregates. *MyJurnal*.

Topçu, I. B., & Uygunoğlu, T. (2010). Lightweight concrete with pumice aggregate. *Construction and Building Materials*.

U

University of Thi-Qar (2023). Mechanical properties of lightweight expanded clay aggregate (LECA) concrete. Civil Engineering Department, University of Thi-Qar.

V

Vinoth, R., & Vinod Kumar, M. (2020). Strength and durability performance of Light Weight Self-Compacting Concrete (LWSCC) with Light Expanded Clay Aggregate (LECA). IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 872, 012104.

W

Walker, P. (1999). Strength, durability and shrinkage characteristics of cement stabilised soil blocks. Cement and Concrete Composites.

Z

Zhang, M. H., & Gjrv, O. E. (2005). Shrinkage of High-Strength Lightweight Aggregate Concrete Exposed to Dry Environment. ACI Materials Journal, 102(2), 86–92.

Annexes

ALGEXPAN

1) Présentation de l'usine « ALGEXPAN »

ALGEXPAN est le seul fabricant de granulats d'argile expansée en ALGERIE et détenteur de l'unique gisement d'argile à propriétés d'expansion sur le territoire. L'usine est implantée à Bouinan (Blida) (Figure 1.1). Le granulat est une harmonie de résistance et de légèreté. ALGEXPAN transforme l'argile en pierre poreuse et résistante par un traitement thermique sans additifs. ALGEXPAN extrait 1 m³ d'argile de la nature pour fabriquer 2 à 3 m³ de matériaux de construction. Le produit est à 100 % Algérien. La capacité de production est de 600 m³ par jour.



Figure 1.1 : Photo du site et logo de l'usine de l'argile expansée « ALGEXPAN ».

2) Procédures de fabrication de l'argile expansée

Auparavant, on a déjà connu que l'argile expansée appartient à la famille des matériaux céramiques. Alors, leur fabrication inclut dans l'industrie de céramique, et comme tout genre de céramisation des produits argileux comme les tuileries et les briqueteries, la fabrication de l'argile expansée aussi suit cinq (5) grandes étapes:

2.1) L'extraction de l'argile et le stockage :

L'extraction se fait dans le lieu où on trouve le gisement (l'argile et schiste) en quantité abondante, ces argiles sont ainsi acheminées vers le lieu de stockage en utilisant les différents moyens de transport (Figure 1.2).



Figure 1.2 : Extraction de gisement

2.2) Le concassage, le broyage et le malaxage :

A ce stade, on diminue la taille du granulat jusqu'à (0.1 ; 0.2 mm), on obtient une farine crue à l'aide des différentes machines comme le concasseur, le broyeur. Après, on ajoute l'eau afin d'obtenir une pâte très homogène.

2.3) Le façonnage :

Dans cette étape, on va donner la forme du produit qu'on voudrait obtenir. Alors, on utilise des moules spéciales en donnant leur forme arrondie dont le diamètre varie entre 10 à 20 mm, S'il n'y en a pas, on fera un petit modelage à main à condition que son diamètre soit obtenu.

2.4) La cuisson :

A cette étape, la bille d'argile crue subit 2 phases bien séparées de cuisson :

La première phase : C'est la phase de préchauffage, 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 deuxième phase : De plus, cette cuisson se fait dans un four rotatif dont la température tends vers 1200°C pendant (1h30) afin d'obtenir une bille d'argile expansée. Il vaut mieux aussi utiliser un four rotatif pour équilibrer et répartir la cuisson dans toutes leurs surfaces.

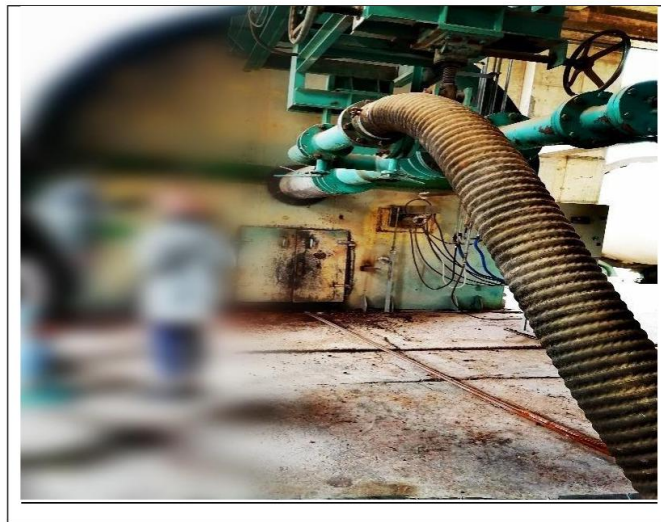
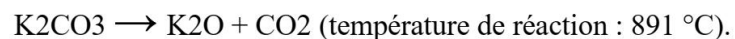
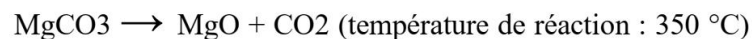
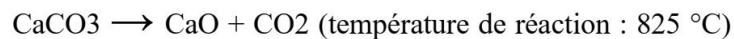


Figure 1.3 : le four rotatif

Dans cette étape, il y a une augmentation de volume des grains qui constituent ce matériau et on a diminution des vides. Le matériau devient compact. Ensuite, on a aussi vitrification des surfaces extérieures de ce matériau due à la cristallisation des silices et des alumines vers ses températures de vitrification. On a donc présence des différents dégagements gazeux qui sont piégés à cause de la formation de la structure vitreuse sur leur surface, Les différentes réactions sont explicitées par les équations :



2.5) Refroidissement et criblage :

La période de refroidissement se fait à l'air libre, Cette période suit directement la phase d'expansion de l'argile. Elle empêche ce matériau ainsi obtenu de fondre. On a donc durcissement total de ce matériau qui améliore la propriété mécanique.

Criblage : Après refroidissement, les billes d'argile expansée sont tamisées et criblées à l'aide d'une série des tamis, pour obtenir quatre classe de granulats :

- Classe 0/3 (sable nodulaire).
- Classe 3/8 (petit gravier nodulaire).
- Classe 8/15 (gravier nodulaire).
- Classe 15/25 (grand gravier nodulaire).

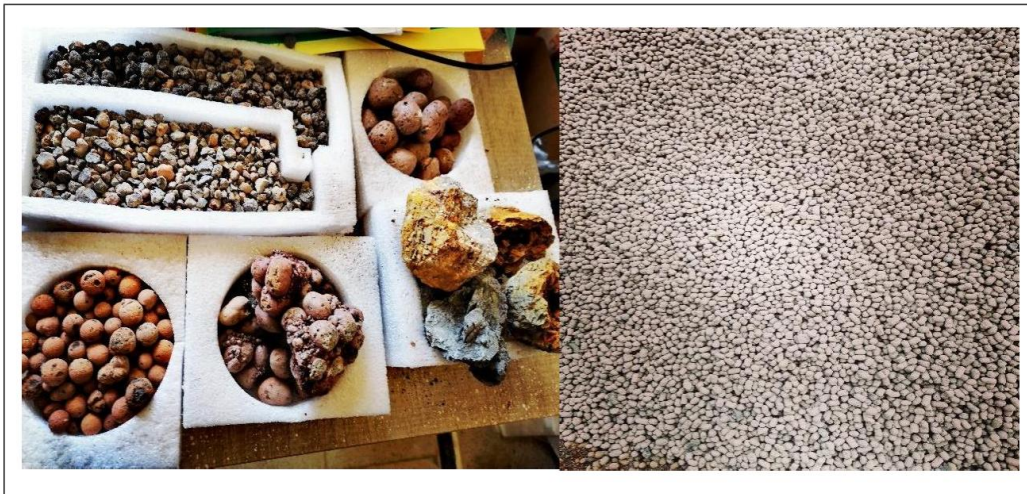


Figure 1.4 : les différentes fractions d'argile expansée.

On obtient un produit léger, dur, à texture cellulaire très marquée dont la masse volumique réelle varie de 750 à 1 200 kg/m³. Après criblage ou éventuellement concassage, les nodules ont, suivant leurs granularités, des masses volumiques apparentes comprises pour la plupart entre 300 et 1 000 kg/m³.

3) Le granulat d'argile expansée

La structure poreuse du granulat et l'écorce céramique qui l'enveloppe lui confèrent la légèreté et la dureté atteignant une résistance élevée à la compression. La surface poreuse et rugueuse du granulat lui permet d'avoir une excellente cohésion avec les liants hydrauliques.

- La masse volumique varie entre 350 à 800 kg/m³.
- La densité des particules entre 900 à 1700 kg/m³.
- La résistance à la compression jusqu'à 12 MPa.
- Le granulat est incombustible Euro classe A1.

4) Domaine d'application

- Renforcement réhabilitation.
- Rattrapage de niveau.
- Pont thermiques de façade.
- Plancher technique.
- Plancher à grande surcharge.
- Remplissage des voutes.
- Isolation et drainage des parois enterrées
- Forme de pente.

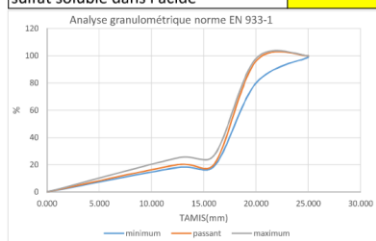
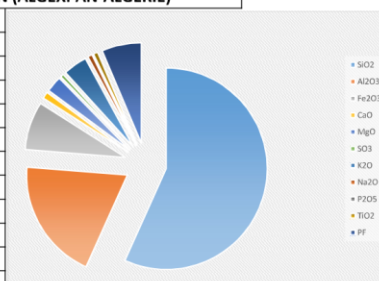
5) Avantages de l'argile expansée

- Bon isolant acoustique
- Bon isolant thermique
- Totalement incombustible, elle n'émet aucune substance en cas d'incendie
- Très bonne durabilité
- Imputrescible, elle ne craint pas les attaques de rongeurs, champignons ou insectes, ni les produits corrosifs
- Perméable à la vapeur, elle résiste à l'eau, mais doit sécher pour retrouver ses propriétés thermiques
- Ne se dégrade pas dans le temps
- Indéformable
- Ne se brise pas en cas de gel.
- Naturelle et écologique

FICHE TECHNIQUE 2025		
AN 15/25 450	VAL.Déclarée	
Essais	DE 450-550	Norme
Forme de granulat	A.N	EN 13055-1
Résistance à l'écrasement en vrac	2.37	EN 13055-1
Masse volumique en vrac	500KG/M3	EN 1097-3
Masse volumique réelle	835KG/M3	EN 1097-6
Résistance au gel/ dégel	/	EN 13055-1
le coefficient de corrélation	1.67	/
Los angeles +micro deval (4-6,3)	/	EN 1097-1&2
Los angeles (4-6,3)	/	EN 1097-2
teneur en fine	/	EN 933-1
coefficient au polissage accéléré	/	EN 1097-8
module de finesse	/	EN 12620
stabilité en volume		EN 13055-1
l'humidité en été	<3%	EN 1097-5
absorption d'eau (5')	5.08%	EN 1097-6
absorption d'eau (30')	6.76%	EN 1097-6
absorption d'eau (24h)	14.46%	EN 1097-6
alcali-réaction	/	EN 13055-1

ANALYSES CHIMIQUE DE L'ARGILE SCHISTEUSE DE BOUINAN (ALGEXPAN-ALGERIE)

	teneur en %	
SiO2	56.68	58.37
Al2O3	19.49	18.18
Fe2O3	7.77	7.53
CaO	1.09	0.93
MgO	2.59	2.86
SO3	0.53	0.71
K2O	3.85	3.51
Na2O	0.71	0.93
P2O5	0.1	0.09
TiO2	0.73	0.72
PF	6.36	6.18
Chlorure		EN 1744-1
Propreté	OK	EN 1744-1
émission de radioactivité	/	EN 13055-1
perte au feu		EN 1744-1
libération de métaux	/	EN 13055-1
libération d'autres substance dangereuse	/	EN 13055-1
libération de carbone pyroaromatiques	/	EN 13055-1
réaction au feu	A1	EN 13055-1
souffre total		EN 1744-1
sulfat soluble dans l'acide		EN 1744-1

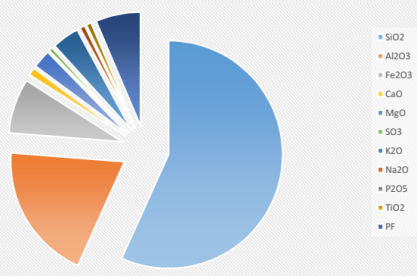


Tamis (mm)	minimum	passant	maximum
0.000	0	0	0
12.500	18	20.02	25
16.000	19	20.47	27
20.000	80	96.14	98
25.000	99	100	100

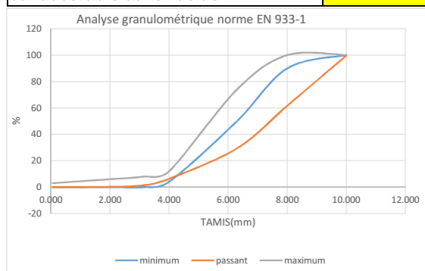
FICHE TECHNIQUE 2024		
AC 3/8 650	VAL.Déclarée	
Essais	DE 600-700	Norme
Forme de granulat	A.C	EN 13055-1
Résistance à l'écrasement en vrac	6.23	EN 13055-1
Masse volumique en vrac	650KG/M3	EN 1097-3
Masse volumique réelle	1093KG/M3	EN 1097-6
Résistance au gel/ dégel	/	EN 13055-1
le coefficient de corrélation	1.74	/
Los angeles +micro deval (4-6,3)	/	EN 1097-1&2
Los angeles (4-6,3)	/	EN 1097-2
teneur en fine	/	EN 933-1
coefficient au polissage accéléré	/	EN 1097-8
module de finesse	/	EN 12620
stabilité en volume		EN 13055-1
l'humidité en été	<3%	EN 1097-5
absorption d'eau (5')	4.84%	EN 1097-6
absorption d'eau (30')	9.36%	EN 1097-6
absorption d'eau (24h)	18.44%	EN 1097-6
alcali-réaction	/	EN 13055-1

ANALYSES CHIMIQUE DE L'ARGILE SCHISTEUSE DE BOUINAN (ALGEXPAN-ALGERIE)

	teneur en %	
SiO ₂	56.68	58.37
Al ₂ O ₃	19.49	18.18
Fe ₂ O ₃	7.77	7.53
CaO	1.09	0.93
MgO	2.59	2.86
SO ₃	0.53	0.71
K ₂ O	3.85	3.51
Na ₂ O	0.71	0.93
P ₂ O ₅	0.1	0.09
TiO ₂	0.73	0.72
PF	6.36	6.18



Chlorure		EN 1744-1
Propreté	OK	EN 1744-1
émission de radioactivité	/	EN 13055-1
perte au feu		EN 1744-1
libération de métaux	/	EN 13055-1
libération d'autres substance dangereuses	/	EN 13055-1
libération de carbone pyroaromatiques	/	EN 13055-1
réaction au feu	A1	EN 13055-1
souffre total		EN 1744-1
sulfate soluble dans l'acide		EN 1744-1

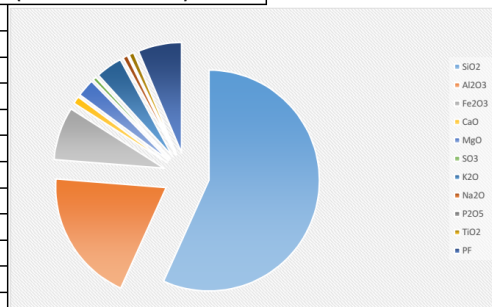


Tamis (mm)	minimum	passant	maximum
0.063	0	0.01	3
2.000	0	0.2	6
3.150	0	1.45	8
4.000	4	6.33	12
6.300	50	29.39	74
8.000	90	61.64	100
10.000	100	99.72	100

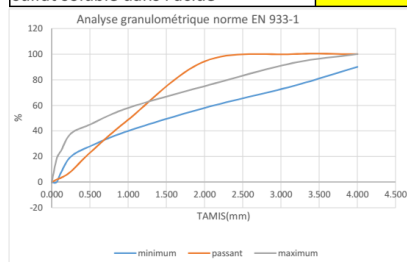
FICHE TECHNIQUE 2024		
AN 0/3 1000	VAL.Déclarée	
Essais	DE 900-1100	Norme
Forme de granulat	A.N	EN 13055-1
Résistance à l'écrasement en vrac	/	EN 13055-1
Masse volumique en vrac	1074KG/M3	EN 1097-3
Masse volumique réelle	1730KG/M3	EN 1097-6
Résistance au gel/ dégel	/	EN 13055-1
le coefficient de corrélation	1.61	/
Los angeles +micro deval (4-6,3)	/	EN 1097-1&2
Los angeles (4-6,3)	/	EN 1097-2
teneur en fine	2.06%	EN 933-1
coefficient au polissage accéléré	/	EN 1097-8
module de finesse	3.22%	EN 12620
stabilité en volume		EN 13055-1
l'humidité en été	<3%	EN 1097-5
absorption d'eau (5')	8.24%	EN 1097-6
absorption d'eau (30')	10.96%	EN 1097-6
absorption d'eau (24h)	15.00%	EN 1097-6
alcali-réaction	/	EN 13055-1

ANALYSES CHIMIQUE DE L'ARGILE SCHISTEUSE DE BOUINAN (ALGEXPAN-ALGERIE)

	teneur en %	
SiO2	56.68	58.37
Al2O3	19.49	18.18
Fe2O3	7.77	7.53
CaO	1.09	0.93
MgO	2.59	2.86
SO3	0.53	0.71
K2O	3.85	3.51
Na2O	0.71	0.93
P2O5	0.1	0.09
TiO2	0.73	0.72
PF	6.36	6.18



Chlorure		EN 1744-1
Propreté	OK	EN 1744-1
émission de radioactivité	/	EN 13055-1
perte au feu		EN 1744-1
libération de métaux	/	EN 13055-1
libération d'autres substance dangere	/	EN 13055-1
libération de carbone pyaromatiques	/	EN 13055-1
réaction au feu	A1	EN 13055-1
souffre total		EN 1744-1
sulfat soluble dans l'acide		EN 1744-1

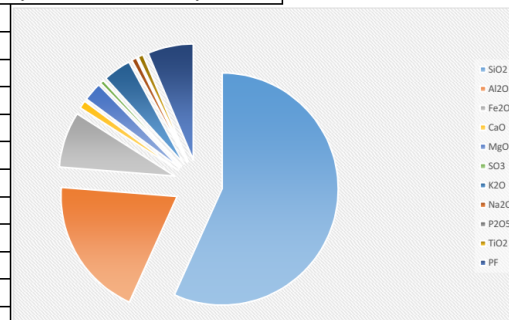


Tamis (mm)	minimum	passant	maximum
0.000	0	0	0
0.063	0	2.09	18
0.125	8	3.55	25
0.250	20	8.29	38
0.500	28	23.04	45
1.000	40	48.8	58
2.000	58	94.41	75
3.150	75	100	93
4.000	90	100	100

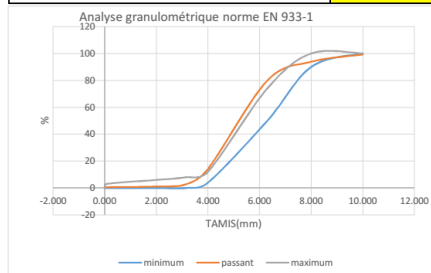
FICHE TECHNIQUE 2024		
AN 3/8 650	VAL.Déclarée	
Essais	DE 600-700	Norme
Forme de granulat	A.N	EN 13055-1
Résistance à l'écrasement en vrac	6.23	EN 13055-1
Masse volumique en vrac	650KG/M3	EN 1097-3
Masse volumique réelle	1093KG/M3	EN 1097-6
Résistance au gel/ dégel	/	EN 13055-1
le coefficient de corrélation	1.68	/
Los angeles +micro deval (4-6,3)	/	EN 1097-1&2
Los angeles (4-6,3)	/	EN 1097-2
teneur en fine	/	EN 933-1
coefficient au polissage accéléré	/	EN 1097-8
module de finesse	/	EN 12620
stabilité en volume		EN 13055-1
l'humidité en été	<3%	EN 1097-5
absorption d'eau (5')	1.90%	EN 1097-6
absorption d'eau (30')	2.28%	EN 1097-6
absorption d'eau (24h)	11.96%	EN 1097-6
alcali-réaction	/	EN 13055-1

ANALYSES CHIMIQUE DE L'ARGILE SCHISTEUSE DE BOUINAN (ALGEXPAN-ALGERIE)

	teneur en %	
SiO2	56.68	58.37
Al2O3	19.49	18.18
Fe2O3	7.77	7.53
CaO	1.09	0.93
MgO	2.59	2.86
SO3	0.53	0.71
K2O	3.85	3.51
Na2O	0.71	0.93
P2O5	0.1	0.09
TiO2	0.73	0.72
PF	6.36	6.18



Chlorure		EN 1744-1
Propreté	OK	EN 1744-1
émission de radioactivité	/	EN 13055-1
perte au feu		EN 1744-1
libération de métaux	/	EN 13055-1
libération d'autres substance dangere	/	EN 13055-1
libération de carbone pyaromatiques	/	EN 13055-1
réaction au feu	A1	EN 13055-1
souffre total		EN 1744-1
sulfat soluble dans l'acide		EN 1744-1

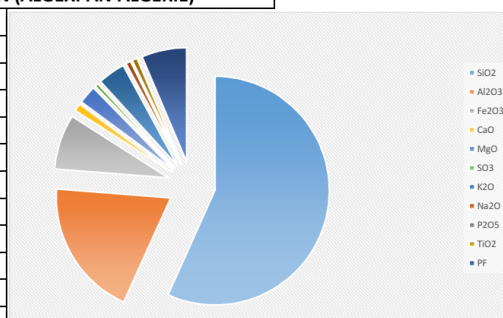


Tamis (mm)	minimum	passant	maximum
0.000	0	0	0
0.063	0	0.57	3
2.000	0	1.08	6
3.150	0	2.75	8
4.000	4	14.12	12
6.300	50	79.86	74
8.000	90	93.84	100
10.000	100	99.19	100

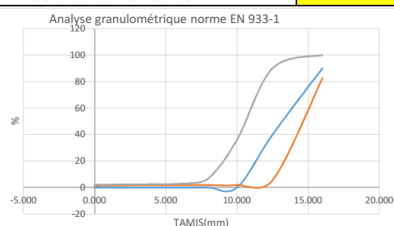
FICHE TECHNIQUE 2024		
AN 8/15 500	VAL.Déclarée	
Essais	DE 500-600	Norme
Forme de granulat	A.N	EN 13055-1
Résistance à l'écrasement en vrac	4.25	EN 13055-1
Masse volumique en vrac	528KG/M3	EN 1097-3
Masse volumique réelle	900KG/M3	EN 1097-6
Résistance au gel/ dégel	/	EN 13055-1
le coefficient de corrélation	1.7	/
Los angeles +micro deval (4-6,3)	/	EN 1097-1&2
Los angeles (4-6,3)	/	EN 1097-2
teneur en fine	/	EN 933-1
coefficient au polissage accéléré	/	EN 1097-8
module de finesse	/	EN 12620
stabilité en volume		EN 13055-1
l'humidité en été	<3%	EN 1097-5
absorption d'eau (5')	3.88%	EN 1097-6
absorption d'eau (30')	4.12%	EN 1097-6
absorption d'eau (24h)	13.60%	EN 1097-6
alcali-réaction	/	EN 13055-1

ANALYSES CHIMIQUE DE L'ARGILE SCHISTEUSE DE BOUINAN (ALGEXPAN-ALGERIE)

	teneur en %	
SiO2	56.68	58.37
Al2O3	19.49	18.18
Fe2O3	7.77	7.53
CaO	1.09	0.93
MgO	2.59	2.86
SO3	0.53	0.71
K2O	3.85	3.51
Na2O	0.71	0.93
P2O5	0.1	0.09
TiO2	0.73	0.72
PF	6.36	6.18



Chlorure		EN 1744-1
Propreté	OK	EN 1744-1
émission de radioactivité	/	EN 13055-1
perte au feu		EN 1744-1
libération de métaux	/	EN 13055-1
libération d'autres substance dangere	/	EN 13055-1
libération de carbone pyaromatiques	/	EN 13055-1
réaction au feu	A1	EN 13055-1
souffre total		EN 1744-1
sulfat soluble dans l'acide		EN 1744-1

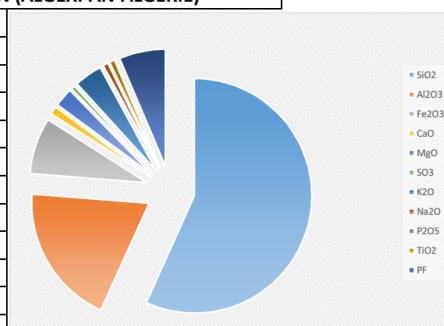


Tamis (mm)	minimum	passant	maximum
0.000	0	0	0
0.063	0	1.42	2
6.300	0	1.81	3
8.000	0	1.84	7
10.000	0	1.88	36
12.500	40	5.44	90
16.000	90	82.42	100

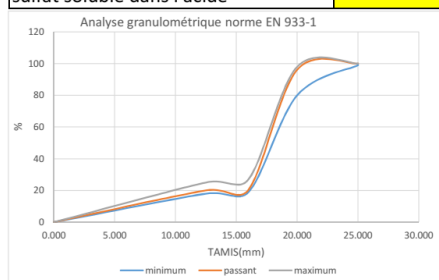
FICHE TECHNIQUE 2025		
AN 15/25 450	VAL.Déclarée	
Essais	DE 450-550	Norme
Forme de granulat	A.N	EN 13055-1
Résistance à l'écrasement en vrac	2.37	EN 13055-1
Masse volumique en vrac	500KG/M3	EN 1097-3
Masse volumique réelle	835KG/M3	EN 1097-6
Résistance au gel/ dégel	/	EN 13055-1
le coefficient de corrélation	1.67	/
Los angeles +micro deval (4-6,3)	/	EN 1097-1&2
Los angeles (4-6,3)	/	EN 1097-2
teneur en fine	/	EN 933-1
coefficient au polissage accéléré	/	EN 1097-8
module de finesse	/	EN 12620
stabilité en volume		EN 13055-1
l'humidité en été	<3%	EN 1097-5
absorption d'eau (5')	5.08%	EN 1097-6
absorption d'eau (30')	6.76%	EN 1097-6
absorption d'eau (24h)	14.46%	EN 1097-6
alcali-réaction	/	EN 13055-1

ANALYSES CHIMIQUE DE L'ARGILE SCHISTEUSE DE BOUINAN (ALGEXPAN-ALGERIE)

	teneur en %	
SiO2	56.68	58.37
Al2O3	19.49	18.18
Fe2O3	7.77	7.53
CaO	1.09	0.93
MgO	2.59	2.86
SO3	0.53	0.71
K2O	3.85	3.51
Na2O	0.71	0.93
P2O5	0.1	0.09
TiO2	0.73	0.72
PF	6.36	6.18



Chlorure		EN 1744-1
Propreté	OK	EN 1744-1
émission de radioactivité	/	EN 13055-1
perte au feu		EN 1744-1
libération de métaux	/	EN 13055-1
libération d'autres substance dangereuses	/	EN 13055-1
libération de carbone pyroaromatiques	/	EN 13055-1
réaction au feu	A1	EN 13055-1
souffre total		EN 1744-1
sulfat soluble dans l'acide		EN 1744-1



Tamis (mm)	minimum	passant	maximum
0.000	0	0	0
12.500	18	20.02	25
16.000	19	20.47	27
20.000	80	96.14	98
25.000	99	100	100