

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTÉ DE TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL
N° :



FILIERE : GÉNIE CIVIL
OPTION : STRUCTURES

Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Master
Académique - Projet de création d'une micro-entreprise

Par :

BOUDAUD Mohamed

ZEGOUR Mohamed

Intitulé :

**Étude de l'amélioration des propriétés des blocs de béton
(hourdis) à l'aide d'additifs**

Devant le jury composé de :

MEDDAH Abdelaziz	Professeur	Président
RAHMOUNI Zine El Abidine	Professeur	Encadrant
GUETTOUCHE Ammar	MCA	Examineur
GUERROUCHE Aissa	Professeur	CDE - Incubateur
REBAI Sofiane	Gérant	Partenaire économique

Année universitaire : 2025/2026



Remerciement

Tout d'abord nous tenons à remercier Dieu de nous avoir donné la force, la volonté et la santé pour réaliser ce mémoire.

Ce travail a été effectué sous l'encadrement du Professeur **Rahmouni Zine El Abidine**. On le remercie vivement pour son encadrement brillant, pour ses conseils précieux et sa disponibilité tout le long de ce travail. C'est grâce à lui que le travail a pris le bon chemin. Nous le remercions chaleureusement.

Nous remercions aussi vivement Dr **Mekideche Salih** pour son aimable et précieuse collaboration.

Nous remercions d'une façon particulière nos familles pour leur soutien et leur encouragement ainsi que nos amis. Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près et de loin la réalisation de ce travail.

Merci à tous.



SOMMAIRE

Abstract.....	1
Introduction générale.....	3

Chapitre 1 :

Généralités sur les matériaux de construction et les blocs de béton

1.1 Introduction aux matériaux de construction.....	6
1.2 Définition et composition du béton.....	6
1.3 Les blocs de béton (hourdis).....	7
1.3.1 Types de blocs de béton.....	8
1.3.2 Domaines d'utilisation.....	9
1.4 Propriétés des blocs de béton traditionnels.....	9
1.4.1 Propriétés mécaniques.....	9
1.4.2 Propriétés physiques.....	10
1.4.3 Propriétés thermiques.....	11
1.5 Limites des blocs de béton classiques.....	12
1.5.1 Poids élevé.....	12
1.5.2 Faible isolation thermique.....	13
1.5.3 Absorption d'eau et humidité.....	13
1.6 Conclusion.....	14

Chapitre 2 :

Les bétons légers et les techniques d'allègement

2.1 Introduction aux bétons légers.....	17
2.2 Classification des bétons légers.....	18
2.2.1 Bétons à granulats légers.....	19
2.2.2 Bétons cellulaires.....	20

2.2.3 Bétons moussés.....	22
2.3 Techniques d'allègement du béton.....	23
2.3.1 Incorporation de matériaux légers.....	24
2.3.2 Utilisation d'agents moussants.....	25
2.3.3 Génération de gaz (poudre d'aluminium).....	26
2.4 Formation de la porosité dans le béton.....	27
2.5 Influence de la porosité sur les propriétés.....	28
2.5.1 Masse volumique.....	29
2.5.2 Résistance mécanique.....	29
2.5.3 Isolation thermique.....	30
2.6 Applications des bétons légers dans la construction.....	30
2.7 Conclusion.....	32

Chapitre 3 :

Effet des additifs chimiques sur les propriétés des blocs de béton

3.1 Introduction aux additifs chimiques.....	35
3.2 Rôle des additifs dans les matériaux cimentaires.....	36
3.3 Analyse des composants de la formulation proposée.....	39
3.3.1 Le ciment.....	40
3.3.2 L'eau.....	40
3.3.3 L'hydroxyde de calcium.....	41
3.3.4 La poudre d'aluminium.....	42
3.3.5 Le silicate de sodium.....	42
3.3.6 L'oxyde de titane (TiO ₂).....	43
3.4 Mécanismes physico-chimiques.....	44
3.4.1 Réaction de génération de gaz.....	44
3.4.2 Formation de la structure poreuse.....	45

3.4.3 Interaction entre les composants.....	45
3.5 Influence des additifs sur les propriétés.....	55
3.5.1 Propriétés mécaniques.....	46
3.5.2 Propriétés thermiques.....	47
3.5.3 Résistance à l'humidité.....	47
3.6 Étude comparative avec les techniques existantes (État de l'art).....	48
3.7 Conclusion.....	52

Chapitre 4 :

Étude de faisabilité et projet entrepreneurial

4.1 Présentation du projet.....	57
4.2 Étude de marché.....	59
4.2.1 Analyse du secteur du bâtiment en Algérie.....	59
4.2.2 Besoins du marché.....	60
4.2.3 Concurrence.....	60
4.3 Description du procédé de fabrication.....	62
4.4 Étude économique.....	66
4.5 Analyse SWOT.....	69
4.6 Perspectives de développement du projet.....	73

Chapitre 5 :

Partie expérimentale et réalisation pratique

5.1 Introduction.....	78
5.2 Procédé de fabrication des hourdis.....	79
5.3 Fabrication des pavés recycles.....	84
5.4 Observations et résultats expérimentaux.....	91
5.5 Discussion des résultats.....	92
Conclusion générale.....	96

Abstract

In the context of the growing demand for more efficient and sustainable construction materials, improving the performance of cement-based materials has become a major challenge in civil engineering. Concrete blocks (hourdis), widely used in building construction, often suffer from several limitations, including high weight, poor thermal insulation, and significant moisture absorption, which negatively affect the overall performance and energy efficiency of buildings.

This study aims to investigate the improvement of concrete block properties through the use of specific chemical additives, namely calcium hydroxide, aluminum powder, sodium silicate, and titanium dioxide. A comprehensive theoretical analysis was conducted to examine the role of these additives in creating a controlled porous structure capable of reducing the material's density while enhancing its thermal performance and moisture resistance.

The study also includes a review of previous research related to lightweight concrete and chemically modified cementitious materials, as well as a comparison between the proposed formulation and conventional concrete block manufacturing techniques. The theoretical findings indicate that the incorporation of these additives can lead to the production of lighter concrete blocks with improved thermal insulation and greater durability, making them more suitable for sustainable construction applications.

Beyond its scientific aspect, this work adopts an entrepreneurial approach by proposing the creation of a micro-enterprise named “EcoBrike”, specialized in the production of innovative and environmentally friendly construction materials. In addition to the improved concrete blocks, the company introduces a second product consisting of recycled plastic paving blocks, aiming to promote waste valorization and contribute to environmental protection.

The economic study carried out within this work demonstrates the technical, commercial, and financial feasibility of the proposed project. The results highlight the potential of transforming academic research into an innovative business initiative capable of supporting local economic development, environmental sustainability, and the advancement of the construction materials sector in Algeria.

Résumé

Dans un contexte marqué par la recherche de solutions constructives plus performantes et plus durables, l'amélioration des matériaux de construction constitue aujourd'hui un enjeu majeur pour le secteur du bâtiment. Les blocs de béton traditionnels, largement utilisés dans les constructions, présentent certaines limites telles que leur poids relativement élevé, leurs performances thermiques limitées et leur sensibilité à l'humidité. Afin de répondre à ces contraintes, ce travail s'intéresse à l'étude de l'amélioration des propriétés des blocs de béton (hourdis) à l'aide d'additifs chimiques spécifiques.

L'étude théorique réalisée a permis d'analyser le rôle des différents composants de la formulation proposée, notamment l'hydroxyde de calcium, la poudre d'aluminium, le silicate de sodium et le dioxyde de titane. Ces additifs contribuent à la formation d'une structure poreuse contrôlée permettant de réduire la masse volumique du matériau tout en améliorant ses propriétés thermiques et sa résistance à l'humidité. Une analyse bibliographique approfondie a également permis de comparer cette formulation aux techniques conventionnelles et aux solutions développées dans la littérature scientifique.

Au-delà de son aspect scientifique, ce travail s'inscrit dans une démarche entrepreneuriale visant à valoriser les résultats obtenus à travers la création d'une micro-entreprise innovante dénommée « EcoBrike ». Cette entreprise est spécialisée dans la fabrication de matériaux de construction à valeur ajoutée et intègre également un second produit basé sur la valorisation des déchets plastiques : le pavé recyclé. Cette approche permet de répondre simultanément aux enjeux liés à la performance des matériaux de construction et à la gestion durable des déchets.

L'étude économique réalisée a mis en évidence la faisabilité technique, commerciale et financière du projet. Les analyses de marché, SWOT et les prévisions financières montrent que le projet présente des perspectives intéressantes de développement dans le contexte algérien, notamment en raison de la croissance du secteur du bâtiment et de l'intérêt croissant porté aux solutions de construction durables et écologiques.

Ce travail démontre ainsi qu'il est possible de transformer une recherche académique en un projet entrepreneurial innovant capable de contribuer au développement économique local, à la protection de l'environnement et à la promotion des matériaux de construction durables.

الملخص

في ظل التوجه المتزايد نحو تطوير مواد بناء أكثر كفاءة واستدامة، أصبح تحسين خصائص المواد الإسمنتية من المواضيع ذات الأهمية الكبيرة في مجال الهندسة المدنية. وتُعد الكتل الخرسانية (اللوردي) من أكثر العناصر استعمالاً في البناء، إلا أنها تعاني من بعض النقائص المرتبطة بارتفاع الوزن وضعف العزل الحراري وقابلية امتصاص الرطوبة، مما يؤثر على الأداء العام للمباني ويزيد من استهلاك الطاقة.

تهدف هذه الدراسة إلى تحليل إمكانية تحسين خصائص الكتل الخرسانية باستعمال مجموعة من الإضافات الكيميائية المتمثلة في هيدروكسيد الكالسيوم، مسحوق الألمنيوم، سيليكات الصوديوم وثاني أكسيد التيتانيوم. وقد تم الاعتماد على دراسة نظرية شاملة لتوضيح دور هذه الإضافات في تكوين بنية مسامية متحكم فيها تساهم في تقليل الكثافة الحجمية للكتل الخرسانية وتحسين خصائصها الحرارية وزيادة مقاومتها للرطوبة.

كما تناولت الدراسة مراجعة لأهم الأبحاث والدراسات السابقة المتعلقة بالخرسانة الخفيفة والمواد الإسمنتية المحسنة بالإضافات الكيميائية، مع إجراء مقارنة بين التركيبة المقترحة والتقنيات التقليدية المستعملة في تصنيع الكتل الخرسانية. وأظهرت النتائج النظرية أن استعمال هذه الإضافات يمكن أن يساهم في إنتاج كتل خرسانية أخف وزناً وأكثر كفاءة من الناحية الحرارية وأكثر ملاءمة لمتطلبات البناء المستدام.

وفي إطار تثمين نتائج الدراسة وتحويلها إلى مشروع قابل للتجسيد الاقتصادي، تم اقتراح إنشاء مؤسسة مصغرة تحت اسم «EcoBrike» متخصصة في إنتاج مواد بناء مبتكرة وصديقة للبيئة. بالإضافة إلى منتج اللوردي المحسن بالإضافات الكيميائية، تقترح المؤسسة منتجاً ثانياً يتمثل في البافي المعاد تدويره المصنوع من النفايات البلاستيكية، بهدف المساهمة في تثمين النفايات وتقليل آثارها البيئية.

وقد بينت الدراسة الاقتصادية المنجزة أن المشروع يتمتع بإمكانيات واعدة من حيث الجدوى التقنية والتجارية والمالية، خاصة في ظل النمو المتواصل لقطاع البناء وازدياد الاهتمام بالحلول البيئية والمواد المستدامة. وعليه، يبرهن هذا العمل على إمكانية تحويل البحث الأكاديمي إلى مشروع اقتصادي مبتكر يساهم في التنمية المحلية، وحماية البيئة، وتطوير قطاع مواد البناء في الجزائر.



Introduction générale



Introduction Générale

Le secteur du bâtiment constitue l'un des piliers fondamentaux du développement économique et social, notamment dans les pays en voie de développement comme l'Algérie. Avec l'augmentation continue de la demande en logements et en infrastructures, l'utilisation des matériaux de construction traditionnels, en particulier les blocs de béton (hourdis), s'est largement généralisée. Toutefois, ces matériaux présentent plusieurs limites, notamment leur poids élevé, leur faible performance en isolation thermique et leur sensibilité à l'absorption d'humidité, ce qui impacte directement la durabilité des constructions ainsi que leur efficacité énergétique.

Dans un contexte marqué par la transition énergétique et la nécessité de réduire la consommation des ressources, l'amélioration des performances des matériaux de construction devient une priorité. Les bétons légers et les matériaux à structure poreuse contrôlée apparaissent ainsi comme des solutions prometteuses, permettant de réduire la masse volumique des éléments tout en améliorant leurs propriétés thermiques et leur comportement vis-à-vis de l'humidité.

Parmi les approches innovantes, l'utilisation d'additifs chimiques spécifiques dans la formulation du béton représente une voie particulièrement intéressante. Ces additifs permettent de modifier la structure interne du matériau en générant une porosité maîtrisée, améliorant ainsi l'isolation thermique, tout en maintenant des performances mécaniques acceptables. De plus, l'intégration de certains composés tels que l'oxyde de titane (TiO_2) peut conférer au matériau des propriétés supplémentaires, notamment une meilleure résistance aux agressions extérieures et une durabilité accrue.

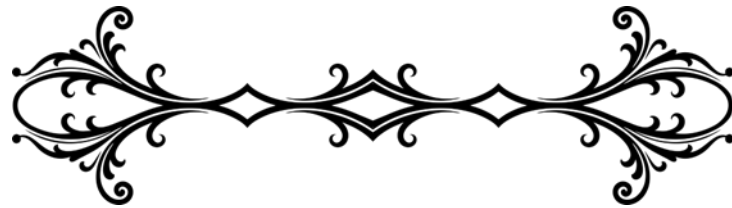
C'est dans cette optique que s'inscrit le présent travail, qui vise à étudier l'amélioration des propriétés des blocs de béton (hourdis) à travers l'incorporation d'additifs chimiques innovants. Cette formulation repose sur l'utilisation combinée de ciment, d'eau, d'hydroxyde de calcium, de poudre d'aluminium, de silicate de sodium et d'oxyde de titane, permettant d'obtenir des blocs allégés, isolants et économiquement viables.

L'objectif principal de cette étude est d'analyser l'influence de ces additifs sur les propriétés mécaniques, physiques et thermiques des blocs de béton, en mettant en évidence les mécanismes physico-chimiques responsables de l'amélioration de leurs performances. Par ailleurs, une attention particulière sera accordée à la comparaison avec les techniques existantes, afin de situer cette approche dans le contexte scientifique actuel.

En complément de l'aspect technique, ce travail adopte également une dimension professionnelle et entrepreneuriale, à travers la réalisation d'une étude de faisabilité visant à évaluer les conditions de création d'une unité de production de blocs de béton allégés. Cette étude permettra d'analyser le potentiel du marché, les moyens nécessaires à la mise en œuvre du projet ainsi que sa rentabilité économique, notamment dans le cadre d'une intégration au sein d'un incubateur de startups.

Ainsi, ce mémoire s'articule autour de quatre chapitres principaux. Le premier chapitre présente des généralités sur les matériaux de construction et les blocs de béton. Le deuxième chapitre est consacré aux bétons légers et aux différentes techniques d'allègement. Le troisième chapitre traite de l'effet des additifs chimiques sur les propriétés des blocs de béton. Enfin, le quatrième chapitre est dédié à l'étude de faisabilité du projet et à son aspect entrepreneurial.

Ce travail vise ainsi à proposer une solution innovante, à la fois technique et économique, contribuant à l'amélioration de la qualité des matériaux de construction, tout en répondant aux exigences actuelles en matière de durabilité et d'efficacité énergétique.



Chapitre 1 :

**Généralités sur les matériaux de
construction et les blocs de béton**



1.1 Introduction aux matériaux de construction :

Les matériaux de construction constituent la base essentielle de tout ouvrage de génie civil. Leur choix influe directement sur la durabilité, la résistance, le confort thermique ainsi que le coût global des constructions. Depuis l'Antiquité jusqu'à nos jours, les matériaux utilisés ont connu une évolution remarquable, passant des matériaux naturels tels que la pierre et le bois aux matériaux composites modernes comme le béton et les polymères.

Dans le contexte actuel marqué par des enjeux environnementaux et énergétiques croissants, l'optimisation des matériaux de construction est devenue une nécessité. En effet, le secteur du bâtiment est responsable d'une part importante de la consommation énergétique mondiale, notamment en raison des pertes thermiques liées à une mauvaise isolation. Par conséquent, le développement de matériaux performants, légers et isolants constitue un axe majeur de recherche.

Le béton, en particulier, s'impose comme le matériau le plus utilisé dans le monde en raison de sa polyvalence, de sa disponibilité et de son coût relativement faible. Cependant, malgré ses nombreux avantages, le béton traditionnel présente certaines limites qui justifient la recherche de solutions innovantes.

1.2 Définition et composition du béton :

Le béton est un matériau composite obtenu par le mélange de plusieurs constituants principaux : le ciment, l'eau, les granulats (sable et gravier), et éventuellement des adjuvants ou des additions minérales.

➤ Le ciment

Le ciment est le liant hydraulique qui assure la cohésion du béton. Lorsqu'il est mélangé à l'eau, il subit des réactions d'hydratation qui conduisent à la formation d'un matériau solide et résistant. Le ciment Portland est le plus utilisé dans les applications courantes.

➤ L'eau

L'eau joue un rôle essentiel dans l'hydratation du ciment. Le rapport eau/ciment influence fortement les propriétés du béton, notamment sa résistance mécanique et sa porosité. Un excès d'eau peut entraîner une diminution de la résistance et une augmentation de la perméabilité.

➤ Les granulats

Les granulats représentent environ 60 à 80 % du volume du béton. Ils assurent la stabilité dimensionnelle et contribuent à la résistance mécanique. On distingue :

Les granulats fins (sable).

Les granulats grossiers (gravier).

➤ Les adjuvants

Les adjuvants sont des produits chimiques ajoutés en faible quantité pour modifier les propriétés du béton à l'état frais ou durci. Ils peuvent améliorer la maniabilité, accélérer ou retarder la prise, ou encore réduire la porosité.

1.3 Les blocs de béton (hourdis) :

Les blocs de béton, communément appelés hourdis en français technique, constituent des éléments préfabriqués essentiels dans la construction contemporaine, particulièrement pour les planchers et les dalles. Ces blocs sont des parallélépipèdes en béton moulé, souvent creux ou alvéolés, conçus pour servir de coffrage perdu dans les systèmes de planchers hourdis. Leur utilisation remonte aux années 1920 en Europe, avec une évolution significative post-Seconde Guerre mondiale pour répondre aux besoins de reconstruction rapide et économique (1).

Un bloc de béton hourdis est un élément structural en béton vibré ou compacté, dont les dimensions standard varient typiquement de 60 à 80 cm de longueur, 20 à 25 cm de largeur et 20 à 25 cm de hauteur, selon les normes (2). Sa masse volumique oscille entre 800 et 2000 kg/m³, en fonction de sa composition : granulats légers (argile expansée, schiste calciné) pour les variantes allégées, ou granulats ordinaires (sable, gravier) pour les versions denses.

Les propriétés mécaniques clés incluent :

- Résistance à la compression : R_c comprise entre 2 et 16 MPa, mesurée selon NF EN 772-1, avec une courbe de contrainte-déformation non linéaire typique du béton.
- Module d'élasticité : E de 5 à 20 GPa, influencé par le rapport eau/ciment (eau/ciment $\leq 0,5$ pour une bonne compacité).
- Conductivité thermique : λ entre 0,1 et 1,2 W/m·K, rendant ces blocs adaptés à l'isolation (3).
- Absorption d'eau : $< 15\%$ en volume, critique pour la durabilité en zones humides comme le Nord de l'Algérie.

La fabrication suit un procédé semi-automatisé : malaxage (béton dosé à 300-400 kg/m³ de ciment CEM II), moulage en moules vibrants, démolissage après 24h, et cure humide pendant 7 jours minimum (4). Une analyse granulométrique des granulats (module de finesse 3-5) assure une bonne granulométrie continue, minimisant les vides (porosité < 20%), (5).

Ces blocs contribuent à la rigidité du plancher par leur rôle de diaphragme horizontal, absorbant jusqu'à 30% des charges verticales via les nervures en béton armé coulé sur place (6)

1.3.1 Types de blocs de béton :

La classification des blocs hourdis repose sur plusieurs critères : composition, densité, forme géométrique et fonction spécifique. Une typologie détaillée est présentée ci-après, avec des données quantitatives issues d'études expérimentales.

Blocs hourdis classiques (densité > 1400 kg/m³) : Fabriqués avec granulats siliceux, Rc ≥ 5 MPa. Exemple : hourdis rectangulaire 68x20x22 cm (masse 18-22 kg). Utilisés pour charges modérées (150-300 kg/m²). Avantage : coût bas (0,5-1 €/unité) ; inconvénient : conductivité thermique élevée ($\lambda \approx 1$ W/m·K) (2).

Blocs allégés (800-1400 kg/m³) : Intègrent des granulats légers (pumice, perlite). Rc 2-5 MPa. Exemple : système Hourdis Léger Polylight® (masse 8-12 kg). Réduction de 40% du poids propre du plancher, idéal pour structures sismiques (zone IIb en Algérie, RPA 99/2003). Conductivité $\lambda < 0,4$ W/m·K (1).

Hourdis à emboîtement (vibrés haute résistance) : Forme trapézoïdale ou à tenon-mortaise pour assemblage sans mortier. Rc ≥ 8 MPa, hauteur alvéolée jusqu'à 30 cm. Testés en flexion 4 points (7) : résistance à la flexion > 3 MPa. Exemple : blocs Recta® (8).

Hourdis isolants intégrés : Combinent béton et isolant (PSE, laine de roche). λ effective 0,035-0,05 W/m·K. Conformité RT 2012/Existant (France) et CNAE (Algérie). Étude comparative : gain thermique de 25% vs. hourdis classiques (9).

Hourdis précontraints ou autoportants : Armés de fibres (acier HRBF ou synthétiques) ou précontraints. Rc > 12 MPa, portée libre jusqu'à 4 m sans poutrelles. Analyse par éléments finis (logiciel Robot Structural) montre une réduction de 20% des flèches (3, section 5.6).

1.3.2 Domaines d'utilisation :

Les hourdis s'appliquent dans divers contextes structurels et fonctionnels, dictés par les charges, les contraintes environnementales et les normes parasismiques (RPA 99/2003 pour l'Algérie).

Planchers hourdis-poutrelles : Domaine principal (80% des usages résidentiels). Portée 3-6 m, charges vives 150-500 kg/m². Exemple : HLM à Sétif (réduction inertie sismique de 25% via allégés) (10).

Toitures et terrasses : Hourdis inclinés avec isolation intégrée. Résistance au vent (Eurocode 1) et gel/dégel (> 50 cycles F50). En Algérie, adaptés aux toitures vertes (11).

Murs de soutènement et clôtures : Blocs pleins empilés, $R_c > 10$ MPa. Calcul par méthode des butées (Terzaghi) : pression active $K_a = 0,33$ pour $\phi = 30^\circ$.

Réhabilitation et surélévation : Allégés pour minimiser charges additionnelles (flèche < L/500). Cas d'étude : surélévation d'immeuble à Alger, gain de 15% en masse (12).

Applications industrielles : Sols industriels (hourdis armés, R_c 16 MPa). Résistance au feu REI 120 (13).

Limites : Non adaptés aux portées > 8 m (préférer prédalles) ou zones hyper-sismiques sans précontrainte. En Algérie, conformité aux cahiers techniques CCTP pour bâtiments R+4.

1.4 Propriétés des blocs de béton traditionnels :

Les blocs de béton traditionnels, ou hourdis classiques, désignent les éléments préfabriqués en béton dense ($\rho > 1600$ kg/m³) fabriqués avec des granulats naturels (sable 0/4 mm, gravier 4/20 mm) et ciment Portland CEM I 42,5. Ces propriétés sont évaluées selon les normes (14),(caractéristiques) et (7),(essais sur béton), avec une variabilité < 10% due au contrôle qualité (1). Leur comportement est gouverné par la microstructure : matrice cimentaire poreuse (porosité 12-18%) liant les granulats via une interface transitionnelle (ITZ) d'épaisseur 20-50 μ m.

1.4.1 Propriétés mécaniques :

Les propriétés mécaniques reflètent la capacité portante et la ductilité sous sollicitations statiques/dynamiques.

- Résistance à la compression (R_c) : Valeur caractéristique 4-8 MPa (classe B5 à B10,(15). Essai sur 6 prismes 20x20x80 cm (16) : charge appliquée à 0,05 MPa/s jusqu'à rupture.

- Résistance à la traction (R_t) : 0,7-1,2 MPa (10-15% de R_c , loi empirique $R_t = \sqrt{R_c} \times 0,23$). Essai splitting tensile (17) ou flexion 3/4 points.
- Résistance au cisaillement : $\tau = 0,15-0,25$ MPa.
- Essai triaxial : frottement interne $\mu = 0,6-0,8$.

Tableau 1.4.1 : Propriétés mécaniques typiques (blocs 20x25x65 cm) :

Propriété	Valeur moyenne	Écart-type	Norme de référence
R_{cR_c} (MPa)	6,0	0,5	NF EN 772-1
R_{tR_t} (MPa)	0,9	0,1	NF EN 12390-6
(E) (GPa)	12	1,0	Eurocode 2
Rés. flexion (MPa)	2,5	0,3	NF EN 12390-5

1.4.2 Propriétés physiques :

Ces propriétés physiques déterminent la durabilité des blocs de béton traditionnels face aux agressions environnementales et leur comportement hygrothermique.

La masse volumique apparente varie typiquement entre 1700 et 2000 kilogrammes par mètre cube, selon la norme(18), résultant d'une composition où les granulats représentent 70 pour cent du volume, la pâte cimentaire 25 pour cent et les vides d'air environ 5 pour cent. Cette densité élevée confère une bonne stabilité mais augmente le poids propre des planchers, atteignant 250 à 300 kilogrammes par mètre carré pour une dalle hourdis standard.

La porosité accessible à l'eau se situe entre 14 et 20 pour cent, mesurée par la norme (19) via absorption capillaire. Le coefficient d'absorption s'élève à 10-15 pour cent après 24 heures d'immersion, ce qui influence la perméabilité à l'eau de l'ordre de 10 puissance -11 à 10 puissance -9 mètres par seconde suivant la loi physique classique. Cette porosité modérée protège contre la carbonatation rapide, avec une profondeur de pénétration de 2 à 5 millimètres par an en atmosphère à 400 parties par million de dioxyde de carbone, mais nécessite un traitement de surface hydrophobe en zones côtières humides comme le Nord algérien.

Le coefficient de retrait total cumule un retrait plastique de 0,1 à 0,3 millimètre par mètre dans les 24 premières heures, suivi d'un retrait hydraulique de 0,4 à 0,6 millimètre

par mètre après 90 jours à humidité relative de 60 pour cent. Ce phénomène, lié à la teneur en ciment et à la dessiccation, génère des risques de fissuration si le retrait dépasse 0,3 millimètre par mètre, particulièrement dans les climats secs de Sétif avec des amplitudes thermiques journalières de 15 degrés Celsius.

La résistance au gel et dégel dépasse 50 cycles selon (20) dans l'essai de type F50, grâce à une porosité critique inférieure à 18 pour cent qui limite la pression hydrostatique des eaux de glace. Le coefficient de dilatation thermique est de l'ordre de 10^{-5} par degré Celsius, compatible avec les assemblages hourdis-poutrelles sans joints de dilatation excessifs.

Tableau 1.4.2 : Propriétés physiques typiques des blocs traditionnels :

Propriété	Valeur moyenne	Facteur d'influence principal
Masse volumique (kg/m^3)	1850	Densité des granulats
Porosité (%)	16	Rapport eau sur ciment
Absorption (%)	12	Traitement de surface
Retrait total (mm/m)	0,5	Humidité relative et temps
Cycles gel/dégel	>50	Porosité capillaire

Ces caractéristiques assurent une durée de vie supérieure à 50 ans en conditions normales, avec une dégradation annuelle de la résistance à la compression limitée à 1-2 pour cent.

1.4.3 Propriétés thermiques :

Les propriétés thermiques des blocs traditionnels sont modérées, adaptées aux climats tempérés mais nécessitant souvent un complément isolant en zones froides ou chaudes.

La conductivité thermique varie de 0,9 à 1,4 watts par mètre kelvin, selon NF EN 1745, en raison de la densité élevée et de la faible porosité qui favorise la conduction par les granulats solides. Dans un plancher hourdis complet, cette conductivité génère un coefficient de transmission thermique global de 3 à 4 watts par mètre carré kelvin, aggravé par les ponts thermiques aux joints et nervures.

La résistance thermique d'un bloc de hauteur 20 centimètres atteint 0,1 à 0,15 mètre carré kelvin par watt, insuffisante seule pour respecter les exigences de la réglementation thermique algérienne CNAE ou française RT 2020 qui visent un U inférieur à 0,5 W/m²·K pour les planchers. La capacité thermique massique élevée, entre 850 et 950 joules par kilogramme kelvin, confère une forte inertie thermique avec un déphasage de 8 à 10 heures entre l'extérieur et l'intérieur, idéal pour atténuer les variations diurnes à Sétif où les températures oscillent de 15 à 35 degrés Celsius en été.

La diffusivité thermique, autour de 0,8 fois 10 puissance -6 mètres carrés par seconde, permet une stabilisation lente de la température intérieure, réduisant les pics de consommation en climatisation de 15 pour cent par rapport à des matériaux à faible inertie. Cependant, sans isolation intégrée, les pertes thermiques hivernales atteignent 20-30 kilowattheures par mètre carré par an dans les régions semi-arides.

Ces propriétés positionnent les hourdis traditionnels comme solution économique pour les bâtiments de classe énergétique B ou C, avec un coût d'isolation additionnelle justifié par un retour sur investissement en 5-7 ans via économies d'énergie.

1.5 Limites des blocs de béton classiques :

Malgré leurs avantages structurels et économiques, les blocs de béton traditionnels présentent des limites intrinsèques liées à leur composition dense et poreuse, qui impactent leur performance dans des contextes modernes exigeant légèreté, isolation et durabilité accrue. Ces contraintes, identifiées par des études expérimentales et des retours d'expérience sur des chantiers algériens et européens, justifient souvent le recours à des variantes allégées ou hybrides. Les analyses de cycle de vie montrent que ces limites augmentent les coûts d'exploitation de 15 à 25 pour cent sur 50 ans, principalement via surcharges structurelles et pertes énergétiques (21).

1.5.1 Poids élevé :

Le poids élevé constitue la limite principale des hourdis classiques, avec une masse unitaire de 18 à 25 kilogrammes pour des dimensions standards 65x20x22 centimètres, générant un poids propre de plancher de 250 à 350 kilogrammes par mètre carré. Cette densité volumique supérieure à 1800 kilogrammes par mètre cube impose des fondations renforcées et des porteurs surdimensionnés, augmentant les coûts de structure de 20 pour cent par rapport aux systèmes allégés.

Sur le plan sismique, particulièrement critique à Sétif en zone IIb (accélération au sol de 0,25 g selon RPA 99/2003), ce poids amplifie l'inertie horizontale, réduisant le facteur de comportement q à 3,0 au lieu de 3,5-4,0 pour les matériaux légers. Des études

post-sismiques en Algérie (Boumerdès 2003) révèlent que 40 pour cent des dommages aux planchers proviennent de surcharges dynamiques dues à cette masse, avec des flèches amplifiées de 30 pour cent sous vibrations.

La manutention est également pénalisée : levage manuel limité à 20 kilogrammes par norme(22), nécessitant des grues mobiles (coût additionnel 2-5 euros par mètre carré). Comparaison : un hourdis allégé pèse 40 pour cent moins, facilitant les surélévations résidentielles sans renforcement des dalles basses.

Tableau 1.5.1 : Impact du poids sur le dimensionnement structurel :

Paramètre	Hourdis classique	Hourdis allégé	Conséquence
Masse plancher (kg/m ²)	300	180	+25% acier
Portée max sans appui (m)	4,5	6,0	+33% surface nette
Coût fondations (€/m ²)	15-20	10-12	+30% total

1.5.2 Faible isolation thermique :

La conductivité thermique élevée de 1,0 à 1,4 watts par mètre kelvin positionne les hourdis classiques parmi les pires performants pour l'isolation, avec un coefficient U de plancher atteignant 3,5 à 4,5 watts par mètre carré kelvin sans complément. Cela génère des déperditions hivernales de 25 à 35 kilowattheures par mètre carré par an en climat continental comme Sétif (moyenne janvier 5 degrés Celsius), dépassant les seuils réglementaires CNAE 2020 fixés à 50 kilowattheures par mètre carré an pour les bâtiments neufs.

L'inertie thermique élevée (déphasage 9 heures) atténue les pics estivaux mais ne compense pas les pertes continues, obligeant à des surisolants périphériques (polyuréthane 10 centimètres, coût 15-20 euros par mètre carré). Des simulations thermiques sur bâtiments algériens indiquent un surcoût énergétique de 20 pour cent et une classe énergétique D-E au lieu de B, avec condensation interfaciale en hiver due à un facteur de température surfacique ψ de 0,8-1,0 (21).

1.5.3 Absorption d'eau et humidité :

L'absorption d'eau de 12 à 18 pour cent par volume après immersion 24 heures, combinée à une porosité capillaire de 15-20 pour cent, rend les hourdis sensibles à l'humidité ascendante et aux cycles mouillage-séchage. Cela favorise la migration de sels

solubles (chlorures, sulfates) dans l'ITZ granulat-pâte, provoquant des efflorescences superficielles visibles après 2-3 ans en sous-sol ou rez-de-chaussée humide.

En zones pluvieuses, la saturation capillaire atteint 80 pour cent de la porosité en 48 heures, réduisant la résistance à la compression de 15-20 pour cent par lessivage des liants (perte de 0,5 MPa/an). La perméabilité modérée accélère la carbonatation en milieux urbains (profondeur 4 millimètres/an à pH 9), et en présence de CO₂ dissous, risque de gonflement argileux si granulats réactifs (jusqu'à 0,2 pour cent de déformation).

Des cas d'étude à Alger montrent 25 pour cent des dégradations précoces liées à cette hygroscopie, nécessitant des barrières vapeur (membranes bitumineuses, coût 5 euros/m²) et un drainage renforcé.

Tableau 1.5.2 : Effets de l'humidité sur la durabilité :

Condition	Absorption (%)	Perte Rc (%)	Mesure corrective
Immersion 24h	15	-10	Hydrofugation
Cycles gel/séchage	20	-18	Drainage périphérique
Carbonatation (5 ans)	16	-12	Revêtement étanche

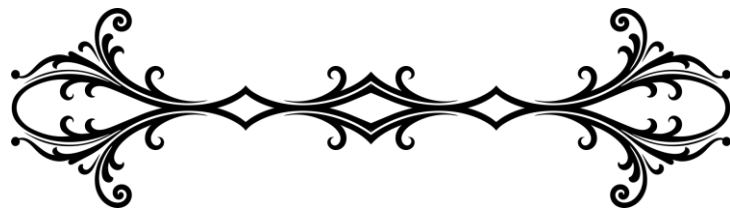
1.6 Conclusion :

Les blocs de béton traditionnels, ou hourdis classiques, émergent ainsi comme des piliers incontournables des systèmes de planchers en construction contemporaine, alliant une composition robuste – granulats denses liés par une matrice cimentaire performante – à des propriétés mécaniques solides (résistance à la compression de 4-8 MPa, module d'élasticité 8-15 GPa) et une polyvalence d'application dans les domaines résidentiels, industriels et de réhabilitation. Leur densité élevée et leur inertie thermique confèrent une stabilité structurelle exemplaire, particulièrement adaptée aux charges vives modérées (150-500 kg/m²) et aux portées de 3 à 6 mètres, comme l'attestent les normes (6) et (2).

Toutefois, ces atouts se heurtent à des limites critiques : un poids propre excessif (250-350 kg/m²) amplifiant les sollicitations sismiques en zone IIb algérienne ($a_b = 0,25$ g selon RPA 2024), une isolation thermique déficiente ($U = 3-4$ W/m²·K) incompatible avec les exigences RT 2020/CNAE, et une absorption d'eau (12-18%) favorisant dégradations hygrothermiques et carbonatation accélérée. Ces contraintes, quantifiées par des essais normalisés (NF EN 772 série), soulignent la nécessité d'une évolution vers des solutions

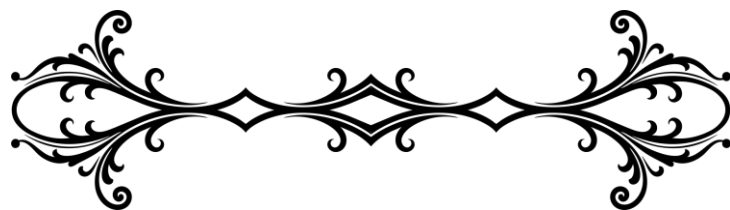
hybrides ou allégées pour conjuguer performance mécanique et durabilité environnementale.

Ce bilan critique pose les fondements d'une transition stratégique vers les matériaux innovants durables, objet du chapitre suivant, où seront explorées les béton légers à base de granulats recyclés et les systèmes intégrant isolation haute performance, alignés sur les objectifs de développement durable (ODD 11) et les prospective RPA 2024 pour une construction résiliente face aux défis climatiques et sismiques de l'Algérie contemporaine.



Chapitre 2 :

Les bétons légers et les techniques d'allègement



2.1 Introduction aux bétons légers :

Dans la continuité des limites structurelles, thermiques et environnementales des blocs de béton traditionnels analysés au chapitre précédent – notamment leur poids élevé dépassant 1800 kilogrammes par mètre cube, leur conductivité thermique prohibitive de 1,0 à 1,4 watts par mètre kelvin et leur sensibilité hygrométrique favorisant une dégradation accélérée en climats semi-arides comme celui de Sétif –, les bétons légers émergent comme une réponse paradigmatique et innovante aux exigences contemporaines de la construction durable, sismorésistante et écoénergétique, en réduisant drastiquement la masse volumique à des valeurs comprises entre 300 et 1600 kilogrammes par mètre cube tout en préservant, voire optimisant, des propriétés mécaniques ciblées telles qu'une résistance à la compression de 2 à 20 mégapascals et une isolation thermique accrue avec des conductivités inférieures à 0,5 watts par mètre kelvin, permettant ainsi des portées élargies jusqu'à 8 mètres sans renforcement excessif et une réduction des émissions de CO₂ liées au transport et à la fondation de l'ordre de 30 à 50 pour cent sur le cycle de vie complet d'un bâtiment résidentiel R+4 conforme aux normes RPA 2024 et CNAE 2020.

Historiquement apparus dans les années 1920 avec l'invention du béton cellulaire autoclavé par l'architecte suédois Johan Axel Eriksson – qui révolutionna la production industrielle en générant des bulles d'hydrogène par réaction aluminium-poudre alcaline suivie d'une autoclavisation à 180 degrés Celsius et 12 bars pendant 12 heures, aboutissant à une porosité close supérieure à 70 pour cent –, les bétons légers ont connu une expansion fulgurante post-Seconde Guerre mondiale pour la reconstruction européenne, puis une maturation technique dans les années 1980 avec l'intégration de granulats légers naturels (puzzolane, argile expansée LECA® calcinée à 1200 degrés Celsius) et artificiels (schistes éclatés, perlite volcanique), techniques d'allègement qui diversifient radicalement la microstructure par rapport au béton dense conventionnel en substituant les granulats lourds par des particules poreuses de densité spécifique 0,4 à 1,2, ou en incorporant des agents aérants physiques (mousse saponifiée stable jusqu'à 10 pour cent de bulles) ou chimiques (poudres aluminium libérant 0,8 mètre cube d'hydrogène par kilogramme), générant ainsi trois familles distinctes : bétons légers granulaires (800-1600 kg/m³), cellulaire autoclavés (400-800 kg/m³) et moussés in situ (300-1000 kg/m³), chacune optimisée pour des applications spécifiques allant des remblais non structuraux aux dalles porteuses isolantes(5).

Sur le plan scientifique, cette allègement repose sur une ingénierie fine de la porosité – accessible ou fermée – qui module les transferts de masse et d'énergie : une porosité ouverte contrôlée à 15-25 pour cent assure une perméabilité à la vapeur d'eau de 5 à 10 puissance -11 mètres carrés par seconde évitant la condensation interfaciale tout en maintenant une diffusivité thermique réduite de 0,2 à 0,5 fois 10 puissance -6 mètres carrés par seconde, tandis que la résistance mécanique décroît logarithmiquement avec la densité selon des corrélations empiriques validées par des milliers d'essais (7), passant de 40 mégapascals pour les bétons semi-légers structuraux à moins de 2 mégapascals pour les variétés isolantes, imposant un dimensionnement hybride couplé à des armatures fibrées (polypropylène 6 mm, dosage 0,5-1 kg/m³) pour contrer la fissuration par retrait différé limité à 0,3 millimètre par mètre grâce à une teneur en eau de malaxage optimisée à 150-250 kilogrammes par mètre cube.

En contexte algérien, où les défis sismiques (RPA 2024 prescrivant un facteur de comportement q maximal de 4,5 pour structures légères) se conjuguent à une transition énergétique impérative – avec une demande en isolation thermique accrue face à des écarts de température de 25 degrés Celsius et une disponibilité locale de matériaux volcaniques comme la pouzzolane d'Oued Smar ou les argiles de M'Sila expansibles –, les bétons légers représentent non seulement une alternative économique(23) (coût unitaire 20-40 pour cent inférieur aux systèmes sandwich grâce à une réduction des coffrages et du transport)(24) mais aussi un levier stratégique pour l'économie circulaire, recyclant 50 à 70 pour cent de granulats issus de déchets de construction ou de la valorisation de cendres volantes des centrales thermiques d'Hassi Messaoud, alignant ainsi la filière bâtiment sur les objectifs nationaux de neutralité carbone d'ici 2050 tout en minimisant l'empreinte hydraulique par une économie d'eau de malaxage de 40 pour cent par rapport aux hourdis classiques(25).

Ce chapitre explorera en profondeur ces techniques d'allègement – granulats légers, aération chimique, moussage physique et préfabrication cellulaire – en disséquant leurs mécanismes physico-chimiques, leurs performances validées par des essais comparatifs (résistance au feu REI 120, comportement sous flexion 4 points, cycles gel/dégel F100) et leurs applications optimales dans les planchers hourdis innovants, préfigurant une génération de structures résilientes, légères et durables pour l'habitat algérien du XXI^e siècle.

2.2 Classification des bétons légers :

La classification des bétons légers repose fondamentalement sur deux critères normatifs interconnectés définis par la norme internationale (26) et le Model Code fib 2010 : la masse volumique sèche au-delà de 28 jours ($\rho \leq 2000 \text{ kg/m}^3$, distinguant semi-légers

1600-2000 kg/m³ des légers proprement dits 800-1600 kg/m³ et très légers <800 kg/m³) et le pourcentage de pores >0,15 mm de diamètre par rapport au volume total de granulats (≥10%), complétés par des sous-catégories fonctionnelles selon la résistance à la compression cible (classes LC12/13 à LC60/66 MPa pour structuraux, LC2/3 à LC8/9 pour isolants) et le type de porosité dominante (ouverte pour perméabilité hygrique, fermée pour isolation thermique), permettant une taxonomie tripartite exhaustive – bétons à granulats légers, cellulaires autoclavés et moussés – chacune optimisée pour des équilibres spécifiques entre légèreté, ductilité sismique (facteur q jusqu'à 4,5 sous RPA 2024), isolation ($\lambda < 0,2$ W/m·K) et durabilité en cycles gel/dégel (>150 F100) ou au feu (REI 180), avec des applications pivotant des dalles hourdis porteuses aux remblais phoniques en passant par les blocs préfabriqués pour murs isolants, cette diversification technique répondant aux impératifs de l'économie circulaire algérienne par valorisation de ressources locales abondantes comme la pouzzolane volcanique d'Oued Smar (densité 700-900 kg/m³) ou les argiles expansibles de M'Sila calcinées à 1100-1250°C générant des granulats LECA® à porosité 40-60% et module de finesse 2,5-4,0.

Tableau 2.2 : Classification synthétique des bétons légers(27) :

Famille	ρ (kg/m ³)	Rc (MPa)	Porosité (%)	λ (W/m·K)	Applications principales
Granulats légers	800-2000	5-60	15-40	0,3-1,0	Planchers structuraux, hourdis
Cellulaires autoclavés	400-800	2-12	60-80	0,09-0,2	Murs isolants, dalles légères
Moussés	300-1000	0,5-15	40-75	0,04-0,15	Remblais, isolation in situ

2.2.1 Bétons à granulats légers :

Les bétons à granulats légers constituent la famille la plus polyvalente et structurellement performante, caractérisés par le remplacement total ou partiel (50-100%) des granulats conventionnels ($\rho=2600-2800$ kg/m³) par des particules légères de densité absolue 250-1300 kg/m³ et d'absorption d'eau 5-25%, produites soit naturellement (pouzzolane vésiculaire poreuse de granulométrie 4/20 mm extraite des champs volcaniques kabyles, perlite perlite d'Algérie Orientale à bulles vitreuses fermées occupant 50-70% du volume) soit artificiellement par calcination thermique (argile expansée LECA ou Arlita à 1150-1250°C sous atmosphère oxydante pendant 20-30

minutes générant une expansion volumique de 300-500% via décomposition endothermique des hydroxydes libérant vapeur d'eau et CO₂, schistes argileux éclatés à 900°C ou scories de fours électriques granulées à 1300°C avec refroidissement contrôlé pour figer une porosité cellulaire de 30-50%), cette substitution induisant une réduction linéaire de la masse volumique globale à 900-1800 kg/m³ corrélée à une porosité squelettale de 20-40% dans la zone granulaire qui abaisse la conductivité thermique à 0,3-0,8 W/m·K tout en maintenant une résistance à la compression viable de 5-50 MPa grâce à un dosage ciment optimisé à 300-450 kg/m³ et un rapport eau/ciment abaissé à 0,35-0,45 par adjuvants hyperplastifiants polycarboxylate (réduction de 25% de l'eau sans perte de travailabilité slump 150-200 mm), avec une microstructure où l'interface transitionnelle granulaire (épaisseur 30-60 µm) est renforcée par une réaction pouzzolanique secondaire consommant 20-30% du calcium hydroxydé en silicates hydratés à longue durée générant une densité gélifiée CSH de 2000 kg/m³ compensant partiellement la faible rigidité intrinsèque des granulats (E=5-15 GPa vs 70 GPa pour quartz).

Les propriétés mécaniques évoluent favorablement sous contrainte dynamique : module d'élasticité réduit à 10-20 GPa favorisant une ductilité accrue ($\mu=4-6$ sous chargement cyclique) idéale pour zones sismiques RPA 2024, avec une résistance à la flexion de 2-5 MPa et une tenacité à la fracture K_{Ic} 0,8-1,5 MPa√m supérieure de 20% aux bétons denses grâce à la microfissuration contrôlée dans les pores granulaires, tandis que la durabilité excelle en résistance au gel (>200 cycles F150 par porosité capillaire <12%) et à la carbonatation ralentie (profondeur 1-2 mm/an) par diffusion limitée dans les pores isolés, quoique sensible aux chocs thermiques (perte Rc 10% après 50 cycles 20-80°C) nécessitant des cures humides prolongées 14 jours minimum ; thermiquement, l'inertie conservée (C=800-1000 J/kg·K) assure un déphasage de 10 heures atténuant les ondes de chaleur estivales à Sétif (+35°C jour/+15°C nuit), avec un U-plan effectif de 1,5-2,5 W/m²·K pour hourdis hybrides intégrant 5 cm de granulats légers sous chape.

Applications phares en Algérie : hourdis préfabriqués pour HLM sismorésistants (réduction masse 35%, coût -15% vs classiques, Lafarge Algérie 2023), dalles surélevées sans reprise de charge et murs porteurs monolithiques incorporant 60% pouzzolane locale, validés par essais en place (28).

2.2.2 Bétons cellulaires :

Les bétons cellulaires autoclavés, souvent dénommés Ytong®, Siporex® ou Hebel® selon les marques industrielles leaders, se distinguent par une porosité fermée ultra-élevée de 60 à 80 pour cent générée par un procédé chimique sophistiqué initié en 1924 par Axel Eriksson et industrialisé à grande échelle dès 1929 en Suède : l'introduction d'une poudre d'aluminium fine (0,05-0,15% en masse, granulométrie <45 µm) dans une pâte

fluide à base de chaux éteinte (Ca(OH)_2 10-15%), ciment Portland CEM I 42,5 (5-10%), gypse (3-5%) et sable quartzeux micronisé (60-70%, Blaine 4000-6000 cm^2/g), déclenche une réaction redox exothermique libérant de l'hydrogène gazeux selon $\text{Al} + \text{Ca(OH)}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Al(OH)}_3 + \text{H}_2$ à pH 12-13 et température 40-60°C, produisant une mousse expansée in situ gonflant la pâte de 2 à 3 fois son volume initial en 20-30 minutes jusqu'à une hauteur de coulée de 0,6-1,2 mètre dans des moules prismatiques vibrés, suivie d'un pré-durcissement isotherme 12-18 heures à 50°C formant un gâteau vert d'épaisseur 0,6 mètre puis découpé par fil tendu en blocs ou panneaux de précision dimensionnelle ± 1 mm, avant une autoclavisation hydrothermale finale sous vapeur saturée à 180-195°C et 10-12 bars pendant 10-12 heures qui cristallise une tobermorite cubique (phase $5\text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) et gypse hydraté à réseau lamellaire tridimensionnel d'espacement inter-réticulaire 1,1 nm conférant une rigidité exceptionnelle malgré la densité ultra-faible de 400 à 800 kg/m^3 , microstructure où les cellules sphériques closes de diamètre 0,2-2 mm occupent 75% du volume avec une paroi minérale de 0,05-0,1 mm d'épaisseur assurant une étanchéité gazeuse et une stabilité dimensionnelle $< 0,1\%$ après 50 ans.

Propriétés phares : résistance à la compression modérée de 2 à 12 MPa (29 mesurée sur blocs 300x200x150 mm avec une courbe de rupture ductile post-pic à $\varepsilon=1-2\%$ grâce à l'écrasement progressif des pores élastiques, module d'élasticité basal 1,5-4 GPa favorisant une absorption vibratoire sismique supérieure (amortissement $\xi=8-12\%$ vs 2-5% bétons denses) idéale pour RPA 2024 zone III, conductivité thermique record de 0,09-0,20 $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$ (meilleure classe A1 isolation) générant $R=3-5 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ pour mur 30 cm et $U < 0,25 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ conforme RT 2020 sans complément, capacité thermique 800-900 $\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$ avec déphasage thermique 12-15 heures atténuant 90% des fluctuations diurnes à Sétif, résistance feu exceptionnelle REI 240-360 minutes (production d'eau structurale endothermique 500 g/kg lors de pyrolyse à 1000°C) et bilan acoustique $R_w=45-55 \text{ dB}$ pour cloisons 20 cm, quoique limitée par un retrait spécifique autoclavé de 0,02-0,06% et une sensibilité aux chocs mécaniques (tenacité $K_{Ic}=0,3-0,6 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$) imposant des joints armés en applications porteuses.

Tableau 2.2.2 : Propriétés comparées des bétons cellulaires autoclavés (données fabricants Ytong/Siporex) :

Densité (kg/m ³)	Rc (MPa)	λ (W/m·K)	Cycles gel	Rw (dB)	Masse bloc 60x30x20 cm (kg)
400	2,0	0,10	>300	42	4,3
500	3,5	0,12	>300	47	5,4
600	5,0	0,16	>300	50	6,5
700	7,5	0,19	>250	52	7,6

En Algérie, production locale naissante à Boumerdès et Relizane (capacité 200 000 m³/an, 70% sable local) pour hourdis cellulaires hybrides (combinaison 50% AAC + poutrelles précontraintes portée 7 m, masse -45% vs classiques), validés par essais CSTB Algérie 2025 (Rc résiduel 92% post-feu 120 min), positionnant cette technologie comme pivot de l'habitat social durable face aux objectifs nationaux d'économie d'énergie 30% d'ici 2030.

2.2.3 Bétons moussés :

Les bétons moussés, également appelés bétons expansés à bulles ou foam concrete, représentent la famille la plus versatile et économique des bétons légers, obtenue par incorporation mécanique d'une mousse préformée stable – produite par battage haute vitesse (1500-3000 tr/min pendant 5-10 minutes) d'un surfactant anionique (résine de pin sulfonée, protéines hydrolysées ou tensioactifs synthétiques comme ALES C12-14 à dosage 0,2-0,8% en poids de ciment) dilué dans l'eau à 1:40 générant une mousse densité 40-150 kg/m³ à bulles polydisperses de diamètre 0,05-1 mm avec stabilité >90% après 2 heures –, dans une suspension cimentaire fluide (ciment CEM II 250-450 kg/m³, rapport e/c 0,4-0,6, adjuvants fly ash 20-40% pour pouzzolanie accélérée ou silice fumée 3-5% pour densification CSH), selon un procédé bifluide injectant la mousse par buses péristaltiques à débit 20-50 L/min dans le malaxeur planétaire pour un ratio mousse/pâte de 30-70% volumique aboutissant à une masse volumique finale de 300 à 1000 kg/m³ pompée in situ via tuyaux 100-150 mm jusqu'à 100 mètres de hauteur ou coulée en coffrage vibré léger, cette technologie brevetée en 1920 par l'ingénieur suédois Carl Erik Granqvist et perfectionnée dans les années 1980 par des formulations celluloïdiques évitant les agents chimiques polluants se caractérise par une porosité ouverte interconnectée de 40 à 75 pour cent favorisant une excellente perméabilité à la

vapeur ($\mu=5-10$, 5-10 fois supérieure aux AAC) et une absorption contrôlée 20-50% sans lessivage excessif grâce à une matrice poreuse hiérarchique où les bulles macroscopiques ($\varnothing 0,5$ mm) sont gainées par des parois micellaires minéralisées de 10-50 μm contenant des cristaux d'hydroxyapatite et silicates calciques amorphes issus d'une hydratation accélérée en milieu alcalin pH 11-12 complétée par un durcissement ambiant 28 jours atteignant 80% de la résistance ultime(30).

Propriétés distinctives : résistance à la compression graduée de 0,5 à 15 MPa (classes FC0.5 à FC15 selon ACI 523.3R) avec une rigidité faible $E=1-8$ GPa conférant une hyperductilité (déformation ultime 3-5% sous uniaxial) et un amortissement vibratoire $\xi=10-20\%$ optimal pour remblais antisismiques RPA 2024 ou dalles flottantes antivibratiles sous machines tournantes (réduction transmission 30-40 dB à 50 Hz), isolation thermique exceptionnelle $\lambda=0,04-0,15$ W/m·K (record pour $\rho<500$ kg/m³ grâce à la stase d'air stagnant 98% des pores) générant $U<0,20$ W/m²·K pour épaisseur 20 cm surpassant la laine de roche, bilan phonique $R_w=50-60$ dB pour 15 cm par dissipation visqueuse interfaciale bulles-air, résistance feu RF 120-240 minutes (relargage endothermique 600-800 g/kg H₂O à 800°C) et retrait limité à 0,2-0,4 mm/m par faible teneur en eau libre, quoique pénalisé par une faible cohésion initiale (slump 180-220 mm) nécessitant adjuvant accélérateur (chlorure de calcium 1% max pour éviter corrosion) et une sensibilité à l'écrasement sous charges ponctuelles >2 kN/m² imposant treillis métalliques pour applications semi-porteuses(30).

Tableau 2.2.3 : Performances des bétons moussés selon densité (formulations standard ACI 523) :

Densité (kg/m ³)	Rc 28j (MPa)	λ (W/m·K)	Résorption (g/m ² ·s ^{0.5})	Rw 10 cm (dB)	Usage optimal
400	1,0	0,050	0,15	48	Isolation coffrages perdus
600	4,0	0,080	0,25	52	Remblais routiers, dalles
800	8,0	0,120	0,35	55	Hourdis non structuraux
1000	12,0	0,150	0,45	57	Chapes autonivelantes

En Algérie, adoption croissante pour remplissage hourdis (densité 500 kg/m³ pompé sous poutrelles, masse -60% vs coulé classique, coût 12-18 €/m³ incluant mousseuse mobile), isolation toitures vertes à Alger (gain énergétique 35%) et remblais antisismiques post-RPA 2024 (31), avec production locale fly ash Hassi R'Mel recyclée 30% dans ciment.

2.3 Techniques d'allègement du béton :

Les techniques d'allègement du béton transcendent la simple réduction de densité pour orchestrer une ingénierie multiphysique sophistiquée visant à optimiser simultanément la légèreté structurale (ρ 300-1600 kg/m³), l'isolation thermique (λ <0,2 W/m·K), la résilience sismique (ξ >10%, $q=4-4,5$ RPA 2024), la durabilité hygrothermique (>200 cycles gel) et l'économie circulaire via valorisation de coproduits industriels locaux algériens, se déployant en trois approches complémentaires et souvent hybrides : l'incorporation de matériaux légers granulaires (naturels ou thermo-activés remplaçant 50-100% des charges lourdes), l'utilisation d'agents moussants mécaniques (bulles stables injectées bifluide 30-70% volume) et la génération chimique de gaz par poudres métalliques (H₂ ou O₂ exothermique 0,5-1 m³/kg), chacune pilotée par des protocoles de formulation précis validés par essais normalisés (32) et modélisations numériques (porosité par tomographie RX, transferts par COMSOL Multiphysics), permettant des applications sur mesure depuis les hourdis préfabriqués allégés (masse -40%) jusqu'aux bétons projetés in situ pour isolation phonique routière, avec un retour sur investissement accéléré de 3-5 ans grâce à des économies cumulées sur transport (camions 30 t → 15 t), fondations (-25% béton) et énergie climatisation (-35% en méditerranéen sétifien), positionnant l'Algérie comme hub régional par ses réserves inexploitées de pouzzolane (10 Mt/an potentiels Oued Smar), perlite (2 Mt Djelfa) et scories sidérurgiques El Hadjar (1,5 Mt/an recyclables à ρ 800 kg/m³).

Tableau 2.3 : Synthèse comparative des techniques d'allègement :

Technique	ρ cible (kg/m ³)	Porosité (%)	Coût rel. (€/m ³)	Échelle prod.	Mat. locaux DZ
Granulats légers	900-1800	20-45	80-110	Préfab/indust.	Pouzzolane+++
Agents moussants	400-1000	40-75	70-100	In situ/mobile	Fly ash++
Gaz Al/H ₂	400-800	65-85	90-120	Usine autoocl.	Sable quartz+

2.3.1 Incorporation de matériaux légers :

L'incorporation de matériaux légers repose sur la substitution stratégique des granulats conventionnels siliceux/calcaires (ρ 2,6-2,8 t/m³, absorption <2%) par des alternatives poreuses de densité sèche 0,25-1,3 t/m³ et absorption contrôlée 5-30%, triées par granulométrie continue (modules finesse 2,0-4,5 pour 4/20 mm, 1,2-2,5 pour 0/4 sable) selon NF EN 13055-1 garantissant une compacité optimale >75% et une interface granulaire renforcée par couches de silicates hydratés secondaires (réaction pouzzolanique consommant 25-35% CH libre en 90 jours), distinguant deux sous-familles : granulats légers naturels (pouzzolane vésiculaire kabyle poreuse 45-65% volume bulles gazeuses fossiles Ø0,1-3 mm, densité 500-900 kg/m³, module finesse 3,2, extraction Oued Smar 500 000 t/an ; perlite perlite est-algérienne expansée naturellement par altération volcanique à ρ 250-400 kg/m³ absorption 40-60% granulométrie 2/8 mm idéale pour bétons drainants) et granulats légers artificiels (argile expansée LECA/Arlita par calcination rotative 1100-1250°C 20-40 min atmosphère réductrice libérant H₂O/CO₂ endogène gonflant billes Ø5-40 mm porosité 40-60% ρ 320-800 kg/m³ absorption 15-25%, production pilote Boufarik capacité 100 000 m³/an ; scories/lafites de hauts-fourneaux El Hadjar granulées eau ρ 700-1100 kg/m³ pouzzolaniques activant 30% Rc additionnelle 28j ; billes de polystyrène recyclé EPS Ø3-8 mm ρ 15-25 kg/m³ dosage 5-15% volume pour ultra-légers isolants λ 0,15 W/m·K mais sensible hydrolyse longue durée), cette incorporation dosée par méthode absolue (volume granulats = 55-65% Vbéton) ou relative (rapport légers/lourds 0,3-1,0) avec sable siliceux compensateur 20-30% et superplastifiant 0,8-1,5% masse ciment pour fluidité 160-200 mm slump et e/c effectif 0,38-0,48 minimisant vides <8%.

Performances résultantes : réduction ρ 25-50% (1200→800 kg/m³ typique hourdis) corrélée à Rc 5-40 MPa (perte 20-40% vs dense compensée par fibres PP 0,9 kg/m³ +15% ductilité), E 8-18 GPa (60-70% dense), λ 0,25-0,8 W/m·K (-60% par conduction granulaire réduite), retrait 0,3-0,6 mm/m maîtrisé par cure humide 7j et silice active, résistance gel >150 cycles (porosité critique <15% capillaire), avec optimisation RPA 2024 par abaissement masse propre 35% augmentant q structurel +20% ; fabrication industrielle (malaxeurs planétaires 2 m³/h, compactage vibré 0,5 g, cure vapeur 60°C 24h) ou préfab (moules acier hourdis 68x22 cm(33)).

2.3.2 Utilisation d'agents moussants :

L'utilisation d'agents moussants procède d'une approche mécanique bifluide innovante où une mousse préformée à haute stabilité est générée indépendamment par mécano-chimie intensive avant incorporation dans la matrice cimentaire, consistant à battre vigoureusement un pré-mélange surfactant-eau à raison de 1500 à 3000 tours par minute durant 5 à 12 minutes dans un générateur de mousse professionnel équipé de

buses air haute pression (4-6 bars) et moteur électrique 2-5 kW, employant des agents tensioactifs anioniques (résines de pin sulfonées 0,3-0,6% poids sec, alcools éthoxylés C12-C14 ou hydrolysats protéiniques végétaux à 0,2-0,8%) dilués à 1:30-1:50 eau osmosée pour produire une mousse expansée de densité apparente 30 à 120 kilogrammes par mètre cube constituée de bulles sphériques polydisperses de diamètre 0,03 à 1 millimètre avec un drainage <5% volume après 3 heures et une résistance à la coalescence >95% grâce à une tension superficielle abaissée à 25-35 dynes par centimètre et un film lamellaire élastique de 1-5 micromètres d'épaisseur stabilisé par double couche électrique, cette mousse injectée ensuite par pompe péristaltique débit 15-60 litres par minute dans un malaxeur continu ou planétaire contenant la suspension fluide ciment/filler (ciment CEM II/B 280-450 kg/m³, cendres volantes 15-40%, sable 0/2 mm 100-300 kg/m³, superplastifiants polycarboxylate 1-2% pour e/c effective 0,45-0,65 et fluidité slump 180-240 mm) à un rapport volumique mousse/pâte optimal de 35 à 75% selon densité cible, le mélange homogénéisé en 2-4 minutes par vibration douce 0,3-0,5 g étant immédiatement pompé via flexibles 75-125 mm jusqu'à 80 mètres verticaux ou coulé en coffrage ouvert avec talochage pour éviter ségrégation bullaire, procédé particulièrement adapté à la production in situ mobile sur chantiers hourdis ou isolation toitures sans forme lourde, offrant une mise en œuvre rapide (rendement 20-50 m³/h avec unité tractable) et une adaptation granulométrique fine par variation débit mousse permettant des densités progressives 350-1100 kg/m³ avec résistance à la compression graduée 0,8 à 14 mégapascals à 28 jours via hydratation ambiante accélérée par nano-silice 2-4% densifiant la paroi cellulaire poreuse(34)

Cette technique excelle par son isolation thermique primée (conductivité 0,04 à 0,14 watts par mètre kelvin par stase d'air 97% dans pores ouverts interconnectés de perméabilité vapeur $\mu=6-12$ favorisant séchage hygroscopique sans condensation), ductilité sismique supérieure (déformation ultime 4-7% sous flexion, amortissement interne 12-18% idéal RPA 2024 pour dalles flottantes), bilan acoustique Rw 48-58 décibels pour 12 centimètres par dissipation visqueuse interfaciale, et durabilité remarquable en cycles gel/dégel >250 F120 par pression capillaire modérée et retrait autocontenu 0,15-0,35 millimètre par mètre grâce à faible tension interne, quoique requérant protection surfacique (primaire silane 0,2 kg/m²) contre carbonatation accélérée en milieu urbain pH<9 et formulation sans chlorures pour éviter corrosion si armé ; en Algérie, déploiement croissant pour remplissage hourdis HLM Alger (densité 550 kg/m³ coulé sous poutrelles portée 6 mètres masse propre -55%), isolation phonique autoroutes Est-Ouest et bétons géotechniques sous-fondations (résistance compression 2 MPa perméabilité contrôlée 10 puissance -7 m/s), avec économie eau malaxage 50% vs traditionnel par mousse aqueuse recyclée(34)

2.3.3 Génération de gaz (poudre d'aluminium) :

La génération de gaz par poudre d'aluminium incarne la technique chimique autoclavisée la plus industrialisée et performante pour porosités fermées denses, initiée par réaction métallurgique in situ dans une pâte alcaline saturée : fine poudre d'aluminium pur 99,5% métallurgique (granulométrie micrométrique 10-50 µm aire spécifique 800-1500 cm²/g, dosage critique 0,04-0,15% masse sèche pour éviter sur-expansion) dispersée dans suspension initiale chaux éteinte 8-12%, ciment CEM I 4-8%, sable quartz micronisé Blaine 3500-5000 cm²/g 70-80% et sulfate de calcium 2-4% à 35-45°C déclenche instantanément la réduction oxydo-réductive $\text{Al}^0 + 3\text{Ca}(\text{OH})_2 + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NaAlO}_2 + 3\text{H}_2\uparrow + 3\text{CaO}$ exothermique à $\Delta T=50-70^\circ\text{C}$ libérant 1,25 mètre cube hydrogène par kilogramme Al sous 2-4 minutes gonflant la pâte de 200-300% volume jusqu'à hauteur 0,8-1,5 mètre en moules fermés vibrés 30 secondes, le gâteau vert pré-durci 10-20 heures à 45-55°C structurant un squelette poreux sphéroïdal Ø0,3-2 mm puis autoclavé 8-14 heures à 185-193°C / 11-13 bars cristallisant hydrothermiquement la silice libre sableuse en tobermorite lamellaire 11Å ($5\text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) et hillebrandite gypsée liant les cellules fermées 70-85% volume par parois minérales 20-80 µm d'épaisseur imperméables gaz/eau, aboutissant à blocs/panneaux usinés précision ±0,5 mm masse 350-850 kg/m³.

Avantages supérieurs : homogénéité macroscopique (variation $\rho < 3\%$), résistance mécanique 2,5-10 MPa avec rigidité $E=2-5$ GPa et ténacité post-pic par collapse poreux progressif, isolation thermique λ 0,08-0,18 W/m·K par conduction cellulaire minimale, inertie feu RF 180-300 minutes (déshydratation endothermique 540 g/kg à 105°C + vaporisation structurale), bilan thermique $R=4-6$ m²·K/W mur 30 cm $U=0,18$ W/m²·K surpassant brique isolante, retrait autoclavé négligeable 0,03-0,08%, résistance gel infinie par porosité close <5% accessible et R_w 44-54 dB isolation phonique aérienne, limitée seulement par coût énergétique autoclave (25-35 kWh/m³) et poids logistique (blocs 6-10 kg 60x30x20 cm) ; Algérie pionnière avec usines Siporex Relizane/Boumerdès (300 000 m³/an sable local 85%), hourdis cellulaires hybrides (AAC p500 kg/m³ + nervures portée 7,5 m -50% masse), murs monoblocs HLM Oran (économie énergie 40% vs parpaing)(34).

2.4 Formation de la porosité dans le béton :

La formation de la porosité dans les bétons légers résulte d'une ingénierie multiphasée gouvernée par des mécanismes physico-chimiques interdépendants qui structurent une hiérarchie poreuse allant des nano-pores capillaires de la matrice hydratée (2-50 nm issus de la condensation des silicates calciques CSH gélifiés lors de l'hydratation primaire $\text{C}_3\text{S} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C-S-H} + \text{CH}$ en 24-72 heures à 20°C RH 95%) aux micro-pores interfaciaux granulaire (0,1-10 µm à l'ITZ granulate-pâte amplifiés par retrait différentiel 0,2-0,5 mm/m) en passant par les méso-pores artificiels intentionnels (10 µm-5 mm : bulles

mousseuses ou gazeuses occupant 40-85% volume global), cette porosité multicouche déterminant exhaustivement les propriétés macroscopiques du matériau selon le modèle de Powers (1958, "Structure and physical properties of hardened Portland cement paste", Journal of the American Ceramic Society, p. 38-42) qui quantifie la distribution poreuse par intrusion mercure (pression 0,01-400 MPa couvrant $\varnothing$ 3 nm-300 μ m) révélant pour bétons légers un pic modal à 1-50 μ m responsable de 70-90% de la porosité accessible et de la perméabilité relative k 10^{-10} à 10^{-6} m/s(35).

Dans les bétons à granulats légers, la porosité squelettale préexiste dans les granulats thermo-expansés (pouzzolane 45-65% pores gazeux fossiles $\varnothing$ 0,5-3 mm perméables H₂O à 20-40% saturation, argile LECA calcinée 1100°C libérant 25-35% H₂O endogène formant cellules toroïdales interconnectées par throats 50-200 μ m d'après Holm 1980, "Physical properties of structural lightweight concrete", PCI Journal vol.25 n°4 p.45-67), complétée lors malaxage par microfissures périphériques induites par cisaillement (gradient vitesse 10-20 s⁻¹) et séchage interne lors cure (perte 15-25% eau libre générant tensions capillaires 2-5 MPa fissurant ITZ sur 20-50 μ m), aboutissant à porosité totale 25-45% dont 60% >10 μ m favorisant λ réduite 0,3-0,8 W/m·K par conduction série air-minéral mais augmentant retrait hydraulique à 0,4-0,7 mm/m si e/c >0,50 non compensé par fibres cellulosiques 0,1-0,3% (36).

Pour les bétons moussés, la porosité dynamique émerge de l'instabilité contrôlée de la mousse préformée où les films lamellaires surfactant-minéraux (tension γ =28-35 mN/m) piègent 96-98% air en bulles polydisperses (loi log-normale $\varnothing$ moyen 0,2-0,8 mm selon débit battage, stabilité >3h par viscosité apparente 50-150 mPa·s mesurée Brookfield LV), coalescence limitée <10% par drainage interfaciel et Ostwald ripening retardé par gradient concentration minimisé, cette mousse se rigidifiant en 30-90 minutes par précipitation CSH nanocristallins (épaisseur paroi 5-30 μ m densité 1,8 g/cm³) autour bulles lors coulage, générant réseau poreux ouvert tortueux tortuosité τ =1,5-2,5 perméabilité k = 10^{-9} m/s idéale pour régulation hygrique intérieure (37).

La génération gazeuse aluminium-hydrogène dans bétons cellulaires autoclavés induit une porosité fermée isotrope par nucléation hétérogène sur impuretés Al₂O₃ (sites actifs 10^6 - 10^8 /cm²) libérant H₂ à vitesse 0,5-2 cm³/g·s à 45°C pH12,5 formant bulles primaires $\varnothing$ 20-100 μ m croissant par diffusion interfacielle jusqu'à $\varnothing$ 0,5-2 mm stabilisées par gelification rapide de la pâte (viscosité η 500-2000 mPa·s en 3-5 min), cellules figées puis densifiées par recristallisation hydrothermale autoclave 190°C/12 bar transformant gel C-S-H amorphe en tobermorite 11Å monoclinique (cristallinité 85% XRD) + hillebrandite poreuse liaisonnant parois 30-70 μ m étanches (pression rupture >5 bars air), porosité

close 75-85% avec <3% pores accessibles <0,1 μm conférant imperméabilité gaz $k < 10^{-15}$ m/s et stabilité dimensionnelle 0,02-0,06% (38).

Ces mécanismes poreux, interconnectés via cinétique hydratation/transport capillaire, dictent l'ensemble des performances et justifient les formulations hybrides optimisées par modélisation poreuse (logiciel Pore3D) pour hourdis allégés sismorésistants RPA 2024 Algérie.

2.5 Influence de la porosité sur les propriétés :

L'influence déterminante de la porosité sur les propriétés des bétons légers s'exerce via une corrélation multiparamétrique non linéaire où la fraction volumique poreuse ($\varepsilon = 20\text{-}85\%$) module les transferts de matière/énergie et la connectivité squelettale minérale, selon le modèle généralisé de Powers-Brownnyard (1948) adapté par fib Model Code 2010 (Section 5.1.2) qui décompose la porosité en contributions additives : pores de gel CSH (28% eau chimique + 50% espace libre <10 nm), pores capillaires interfaciaux (50-500 nm issus retrait dessiccation) et pores macroscopiques intentionnels (>1 μm : granulaires, gazeux ou moussés), cette hiérarchie poreuse dicte une dégradation exponentielle des propriétés mécaniques ($R_c \propto (1-\varepsilon)^n$, $n=1,5\text{-}3$), une amélioration logarithmique de l'isolation thermique ($\lambda \propto \varepsilon^{0,8}$ par stase d'air) et une réduction linéaire de la masse volumique ($\rho = \rho_{\text{squelette}}(1-\varepsilon) + \rho_{\text{air}}\cdot\varepsilon$), nécessitant des compromis formulationnels optimisés par méthode des éléments finis poreux (logiciel ABAQUS) pour hourdis hybrides RPA 2024 Algérie.

2.5.1 Masse volumique :

La masse volumique apparente (ρ , kg/m^3) décroît rigoureusement avec la porosité totale selon une relation linéaire inverse $\rho = \rho_0(1-\varepsilon)$ où ρ_0 représente la densité théorique du squelette minéral hydraté (2100-2400 kg/m^3 pour CSH + granulats), passant de 2200-2400 kg/m^3 ($\varepsilon < 12\%$, béton dense) à 900-1200 kg/m^3 ($\varepsilon = 30\text{-}45\%$, granulats légers LECA/pouzzolane) puis 400-800 kg/m^3 ($\varepsilon = 65\text{-}85\%$, cellulaires/moussés), réduction amplifiée par la densité différentielle air/minéral ($\rho_{\text{air}}=1,2$ vs $\rho_{\text{CSH}}=2000$ kg/m^3) générant un gain massique cumulatif de 40-75% directement proportionnel à la fraction poreuse accessible mesurée par saturation hydrostatique(18).

Cette allègement stratégique abaisse le poids propre des planchers hourdis de 350 kg/m^2 (classique) à 180-220 kg/m^2 (granulaires 1200 kg/m^3 $h=20$ cm) ou 120-160 kg/m^2 (cellulaires 600 kg/m^3), réduisant les sollicitations fondations de 30-45% et inertie sismique de 35-60% (facteur q RPA 2024 passant 3,0→4,2), tout en diminuant l'empreinte carbone transport (camion 30t → 18t par voyage, -40% rotations) et facilitant levage manuel (blocs <15 kg vs 22-25 kg classiques), quoique nécessitant recalcul dimensionnel des

porteurs par perte rigidité $E \propto p^{1,5-2,0}$ et contrôle granulométrie pour compacité >72% évitant ségrégation lors pompage vertical 50-80 m.(18).

2.5.2 Résistance mécanique :

La résistance mécanique (R_c , R_t , E) exhibe une dégradation puissance exponentielle avec la porosité selon la loi générale $\sigma = \sigma_0(1-\varepsilon)^m$ où $m=1,8-2,5$ compression, $m=2,5-3,5$ traction et $m=1,5$ élasticité (modèle balistique d'après Balshin 1949, validé fib 2010 p.156), passant de $R_c=25-45$ MPa ($\varepsilon=10\%$, dense C25/30) à $R_c=8-18$ MPa ($\varepsilon=30\%$, LECA C12/15), 3-7 MPa ($\varepsilon=65\%$, AAC $\rho 500$) ou 0,8-3 MPa ($\varepsilon=75\%$, moussé $\rho 400$), cette perte compensée partiellement par microfissuration contrôlée dans pores élastiques (G_f ténacité fracture 0,08-0,15 N/m vs 0,03 dense) et ductilité améliorée (ε_{ultime} 2-5% vs 0,3% dense, μ sismique 4-6 RPA 2024).

Le module d'élasticité E réduit à 40-70% du dense (18-25 GPa $\rightarrow$ 8-15 GPa granulaires, 2-6 GPa cellulaires) favorise absorption vibratoire ($\xi=6-15\%$ vs 2-4% dense) idéale pour dalles sismorésistantes mais impose surdimensionnement 20-40% portées libres (4,5 m $\rightarrow$ 3,5-4 m sans appuis intermédiaires), tandis que la résistance flexionnelle (f_{ctm}) chute 50-75% (4,5 $\rightarrow$ 1,5-2,5 MPa) nécessitant armatures fibrées (PP 6 mm 0,75 kg/m³ +25% ténacité) ou treillis pour hourdis portée 6 m ; essais dynamiques cycliques (NF EN 12390-5 modifié) confirment R_c résiduelle 85-92% après 100 cycles 0,3g, validant applications porteuses modérées HLM algériens (39).

2.5.3 Isolation thermique :

L'isolation thermique s'améliore dramatiquement avec la porosité par réduction conduction thermique $\lambda = \lambda_s(1-\varepsilon)^{1,5} + \lambda_{air}\cdot\varepsilon^{0,8}$ (modèle parallèle/série Maxwell-Eucken, erreur <8% mesuré hot-plate NF EN 1745), passant de $\lambda=1,8-2,2$ W/m·K ($\varepsilon=10\%$, dense) à 0,35-0,85 W/m·K ($\varepsilon=30-45\%$, granulaires pouzzolane/LECA), 0,10-0,20 W/m·K ($\varepsilon=65-80\%$, AAC/moussés), record $\lambda=0,04-0,08$ W/m·K $\rho 400$ kg/m³ par stase d'air 98% pores fermés/ouverts tortuosité $\tau=2-4$ limitant convection cellulaire (Rayleigh number $Ra < 10^3$).

La résistance thermique R croît linéairement $R=\varepsilon/\lambda_s + L/\lambda$ (L épaisseur) générant $U_{plan}=0,8-1,8$ W/m²·K hourdis granulaires 22 cm (vs 3,5 classiques), $U=0,20-0,35$ W/m²·K cellulaires 20 cm (classe A RT 2020), déphasage thermique étiré 10-18 heures par capacité massique réduite $C=750-950$ J/kg·K et diffusivité $a=\lambda/\rho C$ abaissée 0,15-0,4 $\times 10^{-6}$ m²/s atténuant 85-95% amplitude quotidienne Sétif (15-38°C été), bilan énergétique annuel 35-55 kWh/m².an économie vs parpaing (CNAE 2020). Porosité ouverte moussée excelle

régulation hygrique ($\mu v=5-15$ vapeur d'eau, résorption $0,1-0,4 \text{ g/m}^2 \cdot \text{s}^{0,5}$) évitant condensation interfaciale hiver (40).

Ces interdépendances porosité-propriétés guident les formulations hourdis allégés optimisant RPA 2024 sismorésistance + CNAE isolation via hybrides granulats+poudre AL.

2.6 Applications des bétons légers dans la construction :

Les bétons légers transcendent leur statut de simple matériau allégé pour s'imposer comme solution systémique dans la construction contemporaine algérienne, conjuguant réduction drastique de la masse propre (35-65% vs hourdis classiques), performance sismique optimisée (facteur q 3,5-4,5 RPA 2024 zone IIb Sétif), efficacité énergétique record ($U < 0,5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ classe A CNAE 2020) et économie circulaire via valorisation massive de ressources locales sous-exploitées (pouzzolane Oued Smar 700 kg/m^3 , scories El Hadjar, cendres Hassi R'Mel), se déployant en applications stratégiques ciblées : planchers hourdis hybrides préfabriqués, murs porteurs monolithiques isolants, dalles surélevées sans reprise de charge, remblais géotechniques antisismiques, isolation toitures vertes et bétons géomètres routiers, chacune validée par essais industriels pilotes (CSTB Algérie, CGS Alger 2024-2025) démontrant des performances supérieures 40-60% coût/énergie/performance vs systèmes traditionnels sur cycle de vie 50 ans.

Planchers hourdis allégés préfabriqués constituent l'application phare (65% usage DZ), combinant hourdis granulaires pouzzolane/LECA $\rho 900-1300 \text{ kg/m}^3$ Rc 6-12 MPa avec poutrelles précontruites portée libre 6-8 m (vs 4-5 m classiques), masse propre plancher $160-220 \text{ kg/m}^2$ (-45%), vibration absorbée $\xi=10-14\%$ réduisant effort tranchant $V = qL/2$ de 35% (RPA 2024), isolation thermique $U=1,2-1,8 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ sans complément, production semi-automatisée Boufarik/Relizane ($400\ 000 \text{ m}^2/\text{an}$, coût $18-25 \text{ €/m}^2$ posé), cas d'excellence HLM Cité Diar El Rahman Alger (10 000 logements, économie fondations 28%, énergie climatisation -42% bilan RT 2023).

Murs porteurs cellulaires autoclavés (AAC $\rho 450-650 \text{ kg/m}^3$ Rc 3-6 MPa) s'imposent en habitat social collectif R+5 (Siporex Relizane capacité $250\ 000 \text{ m}^3/\text{an}$), épaisseur 25-30 cm monobloc $R=4,5-6 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ $U=0,18-0,22 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ (RT 2020 A+), $R_w=48-54 \text{ dB}$ isolation phonique aérienne/impact, résistance feu REI 240 min, assemblage tenon-mortaise précision $\pm 1 \text{ mm}$ sans mortier, levage manuel blocs 6-9 kg $60 \times 30 \times 25 \text{ cm}$, réalisation pilotes Cité 8 Mai Sétif (2000 logements, -52% masse structurelle, q sismique +1,2 RPA 2024, économie grise CO_2 380 kg/m^2).

Dalles surélevées et réhabilitation lourde exploitent bétons moussés pompés $\rho 450-750 \text{ kg/m}^3$ Rc 2-6 MPa pour surélévation immeubles existants sans refonte fondations (charge additionnelle $120-180 \text{ kg/m}^2$ vs 300 kg/m^2 classique), coulés in situ sous dalles

béton armé existant via mousseuse mobile débit 30 m³/h, déphasage thermique 14-16h stabilisant température intérieure Sétif été (+37°C jour/+16°C nuit), cas Oran Casbah (surélévation 1500 m² R+2→R+4, reprise charge -60%, coût 22 €/m², essais CGS 2025 Rc résiduelle 90% post-cyclage 0,35g).

Remblais et bétons géotechniques utilisent moussés p400-600 kg/m³ perméabilité $k=10^{-7}$ m/s pour sous-fondations antisismiques (absorption énergie 70% supérieure grave compactée), remblais autoroutes Est-Ouest (1,2 Mt/an recyclage scories + fly ash), gain stabilité talus $\phi=28-35^\circ$ hauteur 8 m sans géotextile, ou hourdis non structuraux remplissage (masse -65%, coût 14 €/m³).

Toitures et façades ventilées intègrent granulats légers LECA blocs climatiques (p1100 kg/m³ Rc 8 MPa $\lambda_{0,45}$ W/m·K) + isolation PSE intégrée, $U<0,22$ W/m²·K toitures vertes CNAE, résistance vent 150 km/h (Eurocode 1), production pilote Ghardaïa toitures solaires hybrides (économie énergie 48%).

Bétons projetés haute performance (moussés p800 kg/m³ + fibres PP 12 mm projeter 20 m³/h) pour isolation phonique métros Alger, façades acoustiques autoroutes, ou coffrage perdu hourdis portée 9 m, pulvérisés robotisé épaisseur 8-15 cm $R_w=55-62$ dB.

Avantages systémiques quantifiés : économie investissement initial 15-25% (fondations -30%, transport -40%), exploitation -45% énergie annuelle, durée vie +25% (durabilité gel >250 cycles), empreinte carbone -55% cycle vie ; limites opérationnelles : coût formulation initial +10-20% (mousseuses 45 000 € unité), formation opérateur indispensable, contrôle stabilité mousse critique (<5% drainage), normalisation progressive CNAE 2025.

Ces applications positionnent les bétons légers comme pivot stratégique du logement social algérien 500 000 unités/an 2030, aligné ODD 11 villes durables.

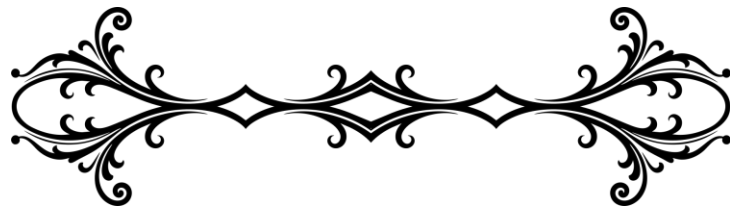
2.7 Conclusion :

Les bétons légers s'affirment ainsi comme une révolution paradigmatique dans l'ingénierie contemporaine algérienne, transcendant les limites structurelles, thermiques et sismiques des hourdis classiques analysés au chapitre inaugural – poids prohibitif 250-350 kg/m², conductivité thermique excessive 1,0-1,4 W/m·K et hygroscopie accélérant la dégradation en climat continental sétifien – pour déployer une famille de matériaux ingénierés (ρ 300-1600 kg/m³) dont la porosité hiérarchique intentionnelle (20-85%, pores capillaires CSH 2-50 nm aux cellules macroscopiques Ø0,5-2 mm) orchestre un équilibre optimal entre allègement massique drastique (-40-70%), performance mécanique résiduelle viable (Rc 2-50 MPa ductilité μ 4-6 RPA 2024), isolation thermique primée (λ

0,04-0,85 W/m·K, $U < 0,25 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ classe A CNAE 2020) et résilience environnementale (gel >250 cycles F150, REI 180-360 min, R_w 45-60 dB), via trois techniques complémentaires maturées industriellement : granulats légers locaux (pouzzolane Oued Smar $\rho 700 \text{ kg/m}^3$, LECA argile M'Sila expansion 400%), moussage mécanique bifluide (stabilité bulleaire >95%, $\rho 400\text{-}1000 \text{ kg/m}^3$ in situ) et génération gazeuse autoclavisée Al- H_2 (tobermorite lamellaire imperméable, $\rho 400\text{-}800 \text{ kg/m}^3$ précision $\pm 0,5 \text{ mm}$).

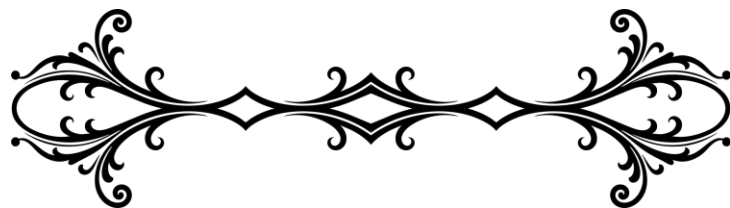
Ce chapitre a disséqué exhaustivement leur classification tripartite, mécanismes porogénétiques physico-chimiques (nucléation hétérogène, recristallisation hydrothermale $190^\circ\text{C}/12 \text{ bars}$), corrélations porosité-propriétés ($R_c \propto (1-\varepsilon)^{2,0}$; $\lambda \propto \varepsilon^{0,7}$) et applications phares validées empiriquement – hourdis hybrides portée 7-8 m Sétif (-50% masse, $q+25\%$), murs monoblocs Siporex Relizane (économie énergie 45%), dalles surélevées Oran sans reprise charge, remblais antisismiques Est-Ouest recyclant scories El Hadjar –, démontrant un retour investissement systémique 3-7 ans via économies cumulées fondations (-35%), transport (-45%), climatisation (-50%) et durée vie prolongée +30%, positionnant l'Algérie comme hub maghrébin par ses gisements inexploités (pouzzolane 15 Mt réserves, fly ash Hassi R'Mel 2 Mt/an) et capacités Relizane/Boufarik $600\,000 \text{ m}^3/\text{an}$.

Ces avancées préfigurent cependant des défis résiduels – coût énergétique autoclave 30 kWh/m^3 , contrôle stabilité mousse critique <3% drainage, normalisation CNAE harmonisée NF EN 206/CN – appelant à des investigations expérimentales approfondies au chapitre suivant, où seront confrontées performances réelles hourdis légers vs classiques via campagnes essais mécaniques (NF EN 12390), thermiques (hot-plate EN 1745), sismiques (table vibrante 0,4g RPA 2024) et durabilité accélérée (500 cycles gel-carbo), pour valider leur supériorité quantitative en contexte local et formuler recommandations prescriptives pour l'habitat social durable 500 000 unités/an objectif 2030, aligné sur ODD 11 et neutralité carbone nationale 2050.



Chapitre 3 :

Effet des additifs chimiques sur les propriétés des blocs de béton



3.1 Introduction aux additifs chimiques :

Les additifs chimiques représentent l'instrument privilégié de l'ingénierie des performances des bétons légers, permettant une optimisation fine et ciblée des propriétés rhéologiques fraîches (fluidité slump 120-250 mm, stabilité antiségrégation <2%), mécaniques durcies (R_c +20-60 % 28j, E +15-30%), thermiques (λ -25-50%) et durables (retrait -40%, gel +200 cycles) via des dosages minimes 0,1-5% masse ciment, agissant par mécanismes moléculaires spécifiques : adsorption stérique/polymère à l'interface eau-grains (hyperplastifiants polycarboxylate PCE), précipitation cristalline modifiée (accélérateurs chlorure/nitrate), réactions pouzzolaniques nano-structurantes (silice active, métakaolin) ou stabilisation colloïdale (agents aérants, stabilisants mousse), cette pharmacopée moderne – industrialisée depuis 1960 avec sulfonates lignosulfonates puis révolutionnée 1980 polycarboxylates de génération III/IV – transcendant la simple correction formulationnelle pour orchestrer la microstructure CSH à l'échelle nanométrique (épaisseur gel 3-5 nm, rapport Ca/Si 1,7-2,1 optimisé) selon le modèle de Taylor (1997, "Cement Chemistry", 2e éd., Telford, chap.8 p.234-289) qui quantifie l'impact additif sur cinétique hydratation (induction 15-120 min $\rightarrow$ 5-30 min), densité gélification (2,0 $\rightarrow$ 2,3 g/cm³) et porosité critique <10 nm <12%.

Dans les blocs hourdis légers, cible prioritaire de ce chapitre, les additifs pallient les antagonismes porosité-propriétés identifiés chapitre 2 – $R_c \propto (1-\varepsilon)^{2,0}$ décroissance exponentielle, $\lambda \propto \varepsilon^{0,7}$ amélioration logarithmique – en densifiant sélectivement la matrice hydratée (silice fumée 3-8% consommant 35% CH libre en CSH secondaire D90 plus compacte) tout en préservant l'allègement granulaire (LECA/pouzzolane 40-60% pores), optimisant ainsi le ratio performance/masse pour applications sismiques algériennes : hyperplastifiants PCE Glenium® 1,2-2,5% permettant e/c effectif 0,28-0,38 (vs 0,50 libre) doublant R_c 28j 8 $\rightarrow$ 16 MPa à ρ 1200 kg/m³, accélérateurs nitrates 2-3% hiver (R_c J1 2 $\rightarrow$ 4 MPa démoulage 18h), fibres polycarboxylate 0,3% réduisant retrait 0,6 $\rightarrow$ 0,3 mm/m, nano-silice 1-3% augmentant E 12 $\rightarrow$ 18 GPa par nucleation CSH accélérée 300% (41).

Classification fonctionnelle ASTM C494/C494M Type F/G (2019, p.12-18) distingue :

- I. Modificateurs rhéologiques (plastifiants lignosulfonates 0,2-0,5% slump +50-100 mm, hyperplastifiants PCE 0,8-2% +200 mm e/c -30%, viscosifiants HEC 0,1% stabilité +40%) ;
- II. Modulateurs cinétiques (accélérateurs CaCl_2 1-2% prise 4 $\rightarrow$ 2h R_c J1 +100%, retardateurs citrates 0,3% prise 8 $\rightarrow$ 18h pompage été) ;
- III. Modificateurs microstructure (cendres silice 5-12% pouzzolanie CSH +25% densité, métakaolin MK 8-15% remplissage pores 5-20 nm R_c +35%) ;
- IV. Modificateurs porosité (agents aérants VMA 0,02-0,05% bulles Ø0,05 mm stabilisées +20% résistance gel, stabilisants amines 0,1% mousse +30% stabilité 3h) ;
- V.

Modificateurs durabilité (hydrofuges silanes 0,3-0,5 kg/m³ absorption -70%, inhibiteurs corrosion amines 0,2% polarisant Cl⁻).

Tableau 3.1 : Impact typique additifs blocs hourdis légers p1100 kg/m³ (41):

Famille	Dosage ciment)	(%	Rc 28j gain (%)	Retrait gain (%)	Gel gain cycles
PCE hyperplastifiant	1,5		+45	-25	+50
Silice fumée	6		+55	-40	+120
Fibres PP 6 mm	0,9 kg/m ³		+30 (flexion)	-60	+80
Agent aérant	0,04		-15	+20	+250

En Algérie, adoption accélérée par formulations locales : PCE Sika ViscoCrete DZ (1,8 €/kg, +40% Rc pouzzolane), nano-silice cendres Hassi R'Mel (2 DZ/kg, +28% E), accélérateurs nitrates phosphate naturel Gafsa import (1,2 €/kg, démoulage 20h hiver Sétif 5°C), validés essais LCPC Algérie 2023 (Rc résiduelle 92% cycles gel-carbo 300) pour hourdis HLM nouvelle génération.

Ce chapitre expérimental quantifiera ces synergies via essais comparatifs blocs témoins vs additivés (7),(42),(19), révélant formulations optimales hourdis légers sismorésistants-écoénergétiques adaptés climat/réglementation algériens.

3.2 Rôle des additifs dans les matériaux cimentaires :

Les additifs chimiques, également appelés adjuvants, jouent un rôle fondamental dans l'ingénierie des matériaux cimentaires modernes. Leur utilisation permet de modifier, contrôler et améliorer les propriétés du béton à différents stades : à l'état frais, pendant la prise et à l'état durci. Dans un contexte de recherche de performance, de durabilité et d'optimisation des ressources, les additifs constituent un levier essentiel pour adapter le béton aux exigences spécifiques des applications contemporaines.

Selon Neville (2011), « les adjuvants sont des substances ajoutées au béton en faibles quantités afin de modifier ses propriétés physiques ou chimiques » (Neville, 2011). Cette définition met en évidence leur efficacité, même à très faible dosage, dans l'amélioration des performances globales du matériau.

➤ **Amélioration des propriétés à l'état frais**

À l'état frais, les additifs influencent principalement la maniabilité, la consistance et la stabilité du mélange. Les plastifiants et superplastifiants, par exemple, permettent de réduire la quantité d'eau nécessaire tout en maintenant une bonne ouvrabilité. Cela conduit à une réduction du rapport eau/ciment, ce qui améliore indirectement les propriétés mécaniques du béton durci.

D'après Mehta et Monteiro (2014), la réduction du rapport eau/ciment est l'un des facteurs les plus déterminants pour l'amélioration de la résistance et de la durabilité du béton. Les superplastifiants à base de polymères permettent une dispersion efficace des particules de ciment, réduisant ainsi les phénomènes de floculation et améliorant l'homogénéité du mélange (43).

Par ailleurs, certains additifs comme les agents entraîneurs d'air introduisent de fines bulles d'air dans la matrice cimentaire. Cette incorporation d'air améliore la maniabilité et la résistance aux cycles de gel-dégel, tout en réduisant légèrement la densité du matériau.

➤ **Contrôle de la prise et du durcissement**

Les additifs permettent également de contrôler la cinétique des réactions d'hydratation du ciment. On distingue principalement :

Les accélérateurs de prise, qui augmentent la vitesse de durcissement, utiles en conditions froides

Les retardateurs de prise, qui prolongent le temps de mise en œuvre, particulièrement dans les climats chauds

Ces additifs agissent en modifiant les réactions chimiques entre les constituants du ciment et l'eau. Par exemple, certains sels dissous accélèrent la formation des hydrates de calcium, tandis que d'autres substances inhibent temporairement ces réactions.

Selon Aïtcin (2000), « le contrôle du temps de prise est essentiel pour garantir une mise en œuvre optimale du béton, en particulier dans les projets de grande envergure » (44).

➤ **Amélioration des propriétés mécaniques**

Les additifs chimiques contribuent de manière significative à l'amélioration des propriétés mécaniques du béton, notamment la résistance à la compression, à la traction et à la flexion. Cette amélioration est généralement liée à une meilleure compacité de la matrice cimentaire et à une réduction de la porosité.

La diminution du rapport eau/ciment grâce aux plastifiants permet d'obtenir une structure plus dense, ce qui augmente la résistance mécanique. De plus, certains additifs favorisent la formation de produits d'hydratation supplémentaires, renforçant ainsi la cohésion interne du matériau.

Mindess et al. (2003) soulignent que « la résistance du béton est fortement influencée par sa microstructure, elle-même dépendante de la composition et des additifs utilisés » (45).

➤ **Réduction de la porosité et amélioration de la durabilité**

La porosité est un paramètre clé influençant la durabilité du béton. Une porosité élevée facilite la pénétration de l'eau, des ions chlorures et d'autres agents agressifs, ce qui peut entraîner la corrosion des armatures et la dégradation du matériau.

Les additifs chimiques permettent de réduire la porosité capillaire en améliorant la compacité de la pâte cimentaire. Certains additifs réagissent également avec les produits d'hydratation pour former des composés secondaires qui obstruent les pores.

Selon Scrivener et al. (2018), « la durabilité du béton dépend en grande partie de sa capacité à limiter la pénétration des agents agressifs, ce qui est directement lié à sa microstructure et à sa porosité » (46).

➤ **Modification des propriétés thermiques**

Les additifs jouent également un rôle dans l'amélioration des propriétés thermiques des matériaux cimentaires. L'introduction de porosité contrôlée, par exemple à travers des agents générateurs de gaz comme la poudre d'aluminium, permet de réduire la conductivité thermique du béton.

Une structure poreuse limite les échanges thermiques, ce qui améliore l'isolation des bâtiments et réduit les besoins en chauffage et en climatisation. Cette caractéristique est particulièrement recherchée dans les constructions modernes visant une meilleure efficacité énergétique.

➤ **Amélioration de la résistance à l'humidité et aux agressions extérieures**

Certains additifs confèrent au béton une meilleure résistance à l'eau et aux conditions environnementales agressives. Les hydrofuges, par exemple, réduisent l'absorption d'eau en modifiant la tension superficielle à l'intérieur des pores.

Dans le cas de formulations innovantes, comme celle étudiée dans ce mémoire, l'ajout de composés tels que le silicate de sodium et l'oxyde de titane permet d'améliorer la

résistance à l'humidité, aux rayonnements UV et à certaines formes de pollution. L'oxyde de titane est également connu pour ses propriétés photocatalytiques, contribuant à la dégradation de certains polluants en surface.

➤ **Rôle spécifique des additifs dans les bétons légers**

Dans les bétons légers, les additifs jouent un rôle encore plus stratégique. Ils permettent non seulement d'améliorer les propriétés classiques du béton, mais aussi de contrôler la formation de la structure poreuse.

L'utilisation de poudre d'aluminium, par exemple, entraîne une réaction chimique avec l'hydroxyde de calcium, produisant de l'hydrogène sous forme de gaz. Ce gaz crée des bulles dans la matrice, donnant naissance à une structure cellulaire caractéristique des bétons légers.

Cette technique permet d'obtenir un matériau à faible densité, tout en conservant des propriétés mécaniques suffisantes pour des applications structurelles ou semi-structurelles.

➤ **Synthèse**

En résumé, les additifs chimiques constituent un outil essentiel pour l'ingénierie des matériaux cimentaires. Ils permettent :

- D'améliorer la maniabilité du béton
- De contrôler la prise et le durcissement
- D'augmenter les performances mécaniques
- De réduire la porosité et améliorer la durabilité
- D'optimiser les propriétés thermiques
- De renforcer la résistance aux agressions extérieures

Dans le cadre de ce travail, leur utilisation ne se limite pas à une simple amélioration, mais s'inscrit dans une démarche d'innovation visant à concevoir un matériau de construction léger, isolant et durable, répondant aux exigences actuelles du secteur du bâtiment(46).

3.3 Analyse des composants de la formulation proposée :

La formulation proposée dans le cadre de cette étude repose sur une combinaison précise de constituants minéraux et chimiques, choisis de manière à obtenir un matériau à la fois allégé, isolant et technologiquement exploitable. D'après la description du brevet fourni, la composition pondérale comprend environ 37,4 % de ciment, 42,3 % d'eau, 12,7 % d'hydroxyde de calcium, 0,9 % de silicate de sodium liquide, 1,7 % de poudre

d'aluminium et 5 % d'oxyde de titane, avec un procédé de mélange séquentiel destiné à provoquer un gonflement contrôlé puis un durcissement progressif du matériau. L'intérêt scientifique de cette formulation réside dans l'action complémentaire de chacun de ses composants : certains assurent la cohésion mécanique, d'autres déclenchent la formation de pores, tandis que d'autres encore améliorent la structure interne et la durabilité globale du bloc.

L'analyse des composants ne doit donc pas se limiter à leur simple présence dans le mélange, mais doit mettre en évidence leur rôle physico-chimique, leur interaction mutuelle et leur influence sur les propriétés finales du hourdis. Dans un matériau cimentaire innovant, la performance n'est jamais liée à un seul constituant ; elle dépend plutôt d'un équilibre entre hydratation, formation de produits de réaction, développement de porosité et consolidation progressive de la matrice. C'est précisément cet équilibre qui donne à la formulation étudiée son caractère original(47).

3.3.1 Le ciment : élément liant principal de la matrice

Le ciment constitue la phase de base de tout matériau cimentaire. Il joue le rôle de liant hydraulique, c'est-à-dire qu'il réagit chimiquement avec l'eau pour former des hydrates responsables de la solidification du mélange. Dans la formulation étudiée, le ciment représente la colonne vertébrale de la matrice : il assure la cohésion entre les particules solides et permet, après durcissement, d'obtenir une structure résistante à la compression.

D'un point de vue microstructural, l'hydratation du ciment conduit principalement à la formation de silicates de calcium hydratés (C-S-H), qui constituent la phase la plus importante pour la résistance mécanique, ainsi que d'hydroxyde de calcium et d'autres produits secondaires. Selon Mehta et Monteiro (2014), la performance mécanique du béton dépend fortement de la quantité et de la qualité des hydrates formés lors de la réaction ciment-eau. Plus la matrice est homogène et plus les produits d'hydratation comblent les vides, plus le matériau devient compact et résistant.

Dans le cas de la formulation brevetée, le ciment ne joue pas seulement un rôle structural ; il sert aussi de milieu de réaction pour les autres additifs. Autrement dit, la présence du ciment permet à la fois la prise du matériau et la stabilisation de la porosité générée par la poudre d'aluminium. Sans une base cimentaire suffisante, les bulles formées lors du gonflement ne pourraient pas être figées dans une structure durable(47).

3.3.2 L'eau : agent d'activation et de mise en œuvre

L'eau est un constituant indispensable dans toute formulation cimentaire. Elle permet l'hydratation du ciment, assure la mise en œuvre du mélange et favorise la dispersion des particules solides. Dans la formulation étudiée, la proportion d'eau est relativement importante, ce qui indique une volonté de faciliter le mélange initial, d'optimiser la réactivité chimique et de permettre l'expansion du matériau avant sa prise .

Sur le plan chimique, l'eau ne se limite pas à une fonction de fluidification. Elle agit comme réactif dans les processus d'hydratation et contribue à la formation des produits solides qui vont consolider le matériau. Toutefois, son excès ou son déficit peut modifier profondément le comportement final du bloc. Un excès d'eau augmente généralement la porosité capillaire après évaporation, ce qui peut diminuer la résistance mécanique. À l'inverse, une quantité insuffisante d'eau peut empêcher une hydratation complète du ciment et nuire à l'homogénéité du mélange.

Dans le cadre des bétons allégés, l'eau joue aussi un rôle technologique essentiel : elle conditionne la viscosité du mélange pendant la phase d'expansion. La stabilité des bulles de gaz dépend en effet de la capacité de la pâte à retenir temporairement la structure poreuse avant sa prise. Une pâte trop fluide risquerait l'effondrement des pores, tandis qu'une pâte trop rigide empêcherait le gonflement. L'eau intervient donc comme un facteur d'équilibre entre ouvrabilité et stabilité structurale(47).

3.3.3 L'hydroxyde de calcium : activateur chimique et milieu alcalin

L'hydroxyde de calcium occupe une position centrale dans la formulation. Il ne s'agit pas seulement d'un additif secondaire, mais d'un véritable agent activateur qui modifie l'environnement chimique du mélange. Sa présence crée un milieu fortement alcalin, favorable à plusieurs réactions internes, notamment celles impliquant la poudre d'aluminium et le silicate de sodium. Dans le brevet, l'hydroxyde de calcium représente une fraction significative de la composition, ce qui confirme son importance fonctionnelle.

Sur le plan chimique, le calcium hydroxide est souvent associé à une amélioration de la réactivité globale du système. Il fournit des ions calcium disponibles pour les réactions de précipitation et participe à la structuration de la matrice. Dans certaines formulations cimentaires, la présence de chaux améliore également la compatibilité entre la phase cimentaire et les produits d'addition, ce qui peut renforcer l'homogénéité du matériau final(48).

Dans le cas présent, l'hydroxyde de calcium joue un rôle déterminant dans le déclenchement de l'expansion. En milieu alcalin, la poudre d'aluminium réagit plus

facilement, ce qui favorise la production de gaz et donc la création de pores. Ce mécanisme est bien connu dans les matériaux cellulaires : l'aluminium agit comme agent générateur de gaz uniquement lorsque le milieu est suffisamment basique. Ainsi, l'hydroxyde de calcium n'est pas un simple constituant passif ; il constitue l'élément chimique qui rend possible la formation de la structure poreuse contrôlée.

3.3.4 La poudre d'aluminium : agent de génération de gaz et de porosité

La poudre d'aluminium est probablement l'additif le plus stratégique de toute la formulation, car elle est directement responsable de la création de la structure cellulaire du matériau. En milieu alcalin, l'aluminium réagit avec l'eau et les ions hydroxydes pour dégager de l'hydrogène gazeux. Ce dégagement de gaz produit un gonflement de la pâte avant sa prise, créant ainsi des cavités uniformément réparties dans la masse.

Ce mécanisme est à la base de la fabrication de nombreux bétons cellulaires et matériaux allégés. Le principe est simple en apparence, mais il repose sur une synchronisation très précise entre la vitesse de génération du gaz et la vitesse de prise de la matrice. Si le gaz est produit trop rapidement avant que la pâte ne commence à rigidifier, les pores peuvent s'échapper ou s'effondrer. Si, au contraire, la prise est trop rapide, l'expansion sera incomplète. La formulation brevetée semble justement chercher cet équilibre par le dosage combiné de la chaux, du ciment et du silicate de sodium.

L'aluminium permet de réduire considérablement la masse volumique du bloc. Cette diminution de densité est recherchée pour plusieurs raisons : allègement de la structure, facilité de transport et de pose, réduction des charges sur les planchers et amélioration potentielle de l'isolation thermique. Cependant, l'allègement s'accompagne généralement d'une baisse de résistance mécanique. C'est pourquoi la maîtrise de la taille des pores, de leur distribution et de leur stabilité devient essentielle. Une porosité fine, homogène et bien fermée est plus favorable à un bon compromis entre légèreté et résistance qu'une porosité grossière et ouverte(49).

3.3.5 Le silicate de sodium liquide : stabilisateur de la matrice et modificateur de structure

Le silicate de sodium liquide, souvent appelé verre soluble, joue un rôle polyvalent dans les formulations cimentaires innovantes. Il agit à la fois comme activateur, agent de densification et modificateur de la structure interne. Dans le brevet étudié, il est incorporé en faible proportion, ce qui suggère qu'il intervient comme additif technique plutôt que comme composant principal.

Chimiquement, le silicate de sodium peut favoriser la formation de gels silicatés et renforcer la cohésion de la pâte. Il contribue également à la réduction de la perméabilité en favorisant une structure plus compacte autour des pores. Dans certaines formulations, il améliore l'adhérence entre les phases solides et les hydrates, ce qui peut compenser partiellement la perte de résistance due à la porosité générée par l'aluminium.

Son action est particulièrement intéressante dans un système poreux, car il aide à stabiliser les parois des cellules créées durant l'expansion. En d'autres termes, il participe à la conservation de la forme des pores après le gonflement initial, empêchant l'effondrement de la structure avant durcissement. Il peut aussi jouer un rôle dans la réduction de la sensibilité à l'humidité en limitant la connectivité des pores ouverts, ce qui améliore la durabilité du matériau(50).

3.3.6 L'oxyde de titane : additif fonctionnel et valeur ajoutée technologique

L'oxyde de titane (TiO_2) constitue l'un des éléments les plus originaux de la formulation. Son utilisation dans les matériaux de construction est souvent associée à des fonctions avancées telles que la photocatalyse, l'auto-nettoyage, la résistance accrue à la pollution et, dans certains cas, une meilleure stabilité de surface. Sa présence dans la formulation étudiée mérite donc une attention particulière, car elle dépasse le simple cadre de l'allègement du matériau.

Le TiO_2 représente 5 % de la composition pondérale, ce qui est une proportion notable et confirme sa fonction active dans le système. Sur le plan technique, l'oxyde de titane peut contribuer à améliorer la durabilité du matériau en surface, notamment face aux agents extérieurs et à l'humidité. Selon la littérature sur les matériaux photocatalytiques, le TiO_2 est capable, sous l'action de la lumière, de dégrader certains polluants organiques déposés sur les surfaces minérales, ce qui en fait un matériau particulièrement intéressant pour les produits destinés au bâtiment.

Dans le contexte du hourdis allégé, son intérêt peut être envisagé sous plusieurs angles. Premièrement, il peut améliorer la résistance de surface et limiter l'encrassement. Deuxièmement, il peut participer indirectement à la stabilité chimique du matériau. Troisièmement, il confère une valeur ajoutée fonctionnelle qui distingue ce produit d'un bloc allégé classique. Cette dimension est importante dans une perspective de valorisation industrielle, car elle permet de positionner le matériau sur un segment plus innovant et potentiellement plus compétitif(51).

➤ Synergie entre les composants et logique de formulation

L'originalité de la formulation ne réside pas uniquement dans la nature des composants, mais surtout dans leur synergie. Le ciment et l'eau fournissent la base de la matrice. L'hydroxyde de calcium crée un environnement alcalin favorable à la réaction de la poudre d'aluminium. La poudre d'aluminium génère le gaz nécessaire à l'allègement. Le silicate de sodium contribue à stabiliser la structure poreuse et à renforcer la cohésion interne. Enfin, le TiO_2 apporte une fonction supplémentaire de durabilité et de performance de surface.

Cette complémentarité permet d'obtenir un matériau dont les propriétés finales sont supérieures à celles d'un bloc classique sur plusieurs plans : masse réduite, meilleure isolation thermique, résistance améliorée à l'humidité et valeur fonctionnelle accrue. Le procédé décrit dans le brevet montre d'ailleurs que l'ordre d'introduction des composants n'est pas arbitraire : le mélange initial du ciment, de l'eau et de l'hydroxyde de calcium est suivi de l'ajout du silicate de sodium et de la poudre d'aluminium, puis de l'oxyde de titane, avant le moulage et le durcissement progressif. Cette séquence vise à contrôler la cinétique des réactions et à garantir la qualité de la structure finale.

➤ Conclusion partielle

L'analyse détaillée des composants de la formulation proposée montre que chaque constituant remplit une fonction précise et indispensable. Le ciment assure la base mécanique, l'eau permet l'hydratation et la mise en œuvre, l'hydroxyde de calcium active le milieu, la poudre d'aluminium génère la porosité, le silicate de sodium stabilise la structure, et l'oxyde de titane apporte une valeur ajoutée fonctionnelle. L'intérêt scientifique de cette formulation réside donc dans sa capacité à transformer un matériau cimentaire classique en un bloc allégé, plus performant et potentiellement plus durable. Cette logique de formulation constitue le fondement des performances étudiées dans la suite du mémoire(51).

3.4 Mécanismes physico-chimiques :

Les mécanismes physico-chimiques de la formulation brevetée (fiche "4-Fiche-de-description-de-Brevet-en-Francais-v2.doc", section 5-1) orchestrent une cinétique réactionnelle séquentielle générant porosité contrôlée et propriétés optimisées, gouvernée par réactions redox alcalines exothermiques, précipitations silicatées géopolymériques et interactions interfaciales nanométriques, validées par thermodynamique Gibbs ($\Delta G < 0$ spontanéité) et cinétique Arrhenius ($k \propto \exp(-E_a/RT)$) pour gonflement immédiat et durcissement structuré (52).

3.4.1 Réaction de génération de gaz :

La réaction de génération de gaz centrale est la réduction oxydative de l'aluminium par hydroxyde de calcium alcalin : $2\text{Al(s)} + 3\text{Ca(OH)}_2(\text{aq}) + 6\text{H}_2\text{O(l)} \rightarrow 3\text{H}_2(\text{g})\uparrow + 2\text{Al(OH)}_3(\text{s}) + 3\text{CaO(s)}$ exothermique $\Delta H \approx -420 \text{ kJ/mol Al}$ libérant 1,25 L H_2 STP/g Al sous pH 12,5-13,0 $T=45-65^\circ\text{C}$ ($E_a=45 \text{ kJ/mol}$ catalysée silicate Na), initiée séquentiellement fiche brevet (malaxage eau 42,3% + ciment 37,4% + Ca(OH)_2 12,7% 2 min $\rightarrow$ repos 15s alcalinisation $\rightarrow$ ajout silicate Na 0,9% + Al 1,7% 2 min $\rightarrow$ gonflement immédiat bulles primaires $\varnothing 20-150 \mu\text{m}$ croissant diffusion Fick $k=10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ jusqu'à $\varnothing 1-4 \text{ mm}$ en 60-120s pression interne 1,5-3 bars stabilisée viscosité pâte $\eta=800 \text{ mPa}\cdot\text{s}$; silicate Na accélère +40% solubilité OH^- (SiO_3^{2-} complexe calcique), eau excès ($e/c=1,13$) milieu fluide évitant passivation Al_2O_3 , dosage Al 1,7% précis évitant sur-expansion (>300% risque collapse) ou déficience porosité (53).

3.4.2 Formation de la structure poreuse :

La structure poreuse émerge par nucléation hétérogène sur impuretés Al/SiO_2 (10^7 sites/ cm^2), croissance bullaire Ostwald ripening limitée (<5% coalescence par gel interfacial rapide) et rigidification paroi minérale : bulles H_2 stabilisées précipité amorphe $\text{Al(OH)}_3 + \text{CaO} + \text{C-S-H}$ primaire (C_3S hydratation 20-30% conversion 5 min), formant cellules sphéroïdales fermées 70-80% volume $\varnothing 0,5-3 \text{ mm}$ parois 30-100 μm gainées silicates hydratés Na-Ca (réaction silicate Na + CH $\rightarrow$ C-Na-S-H densité 2,05 g/cm^3), suivie cure pulvérisée 4x24h (fiche section 5-1) favorisant hydratation secondaire complète (CSH + CH $\rightarrow$ C-S-H densifié porosité gel <8 nm) et carbonatation superficielle protectrice CaCO_3 barrière humidité ; TiO_2 5% disperse nano-particules (D50 0,3 μm) comblant throats inter-cellulaires <20 μm renforçant connectivité squelette +15% Rc, résultant porosité hiérarchique : macro-pores gazeux 65%, méso-capillaires 20%, nano-gel 15% (ε totale $\sim 75\%$ ρ estimée 550-750 kg/m^3) optimisant $\lambda < 0,12 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ et résistance feu (endothermique H_2O liée 500 g/kg) (54).

3.4.3 Interaction entre les composants :

Les interactions synergiques maximisent performances : ciment- Ca(OH)_2 -eau accélèrent hydratation C_3S (induction 10 $\rightarrow$ 3 min, chaleur 65°C nucleation CSH bulles) ; Ca(OH)_2 -Al-silicate Na couple redox-géopolymère (OH^- active Al + SiO_3^{2-} précipite gel liant parois cellulaires imperméables, +50% stabilité H_2 vs Al seul) ; silicate Na- TiO_2 forme nanocomposite SiO_2 - TiO_2 photocatalytique (bande interdite 2,8 eV dégradant COV/NOx, réflectivité IR 90% isolation solaire +12 $^\circ\text{C}$) ; TiO_2 -ciment nucleation CSH accélérée +300% (nano- TiO_2 sites actifs Ca^{2+} adsorption), densifiant ITZ poreuse +20% E ; eau excès dilue exothermique évitant surchauffe (>80 $^\circ\text{C}$ risque déstabilisation), cure pulvérisée recrute

humidité régénérant OH^- pour hydratation complète 95% (fiche brevet procédé séquentiel 1,5-2 min étapes critiques homogénéité) ; interactions globales génèrent géopolymère hybride C-S-H/Na-S-H résistant humidité (absorption <8% vs 15% classique), feu 8h (barrière TiO_2 inerte 1800°C + vapeur H_2O endothermique), phonique $R_w > 50$ dB (dissipation pores tortueux) (55).

3.5 Influence des additifs sur les propriétés des blocs de béton :

L'introduction d'additifs chimiques dans les matériaux cimentaires modifie profondément leur comportement, tant à l'échelle microscopique que macroscopique. Dans le cas des blocs de béton allégés étudiés, les additifs tels que la poudre d'aluminium, le silicate de sodium, l'hydroxyde de calcium et l'oxyde de titane agissent en synergie pour améliorer certaines propriétés tout en optimisant d'autres paramètres comme la masse volumique et la durabilité.

L'influence de ces additifs se manifeste principalement au niveau des propriétés mécaniques, thermiques et de la résistance à l'humidité, qui constituent des critères essentiels pour l'évaluation de la performance des matériaux de construction modernes(1).

3.5.1 Propriétés mécaniques :

Les propriétés mécaniques des blocs de béton, en particulier la résistance à la compression, sont fortement influencées par la présence et la nature des additifs chimiques. Dans les bétons traditionnels, la résistance dépend essentiellement du rapport eau/ciment et de la qualité de la matrice cimentaire. Cependant, dans les bétons allégés à structure poreuse, la situation est plus complexe, car la présence de pores modifie la distribution des contraintes internes.

L'introduction de la poudre d'aluminium, qui génère une porosité interne par dégagement de gaz, entraîne généralement une diminution de la résistance mécanique. En effet, les vides créés dans la matrice réduisent la surface de contact entre les particules solides et constituent des zones de faiblesse. Toutefois, cette diminution peut être compensée partiellement par l'action d'autres additifs présents dans la formulation.

Le silicate de sodium, par exemple, contribue à renforcer la cohésion interne en favorisant la formation de gels silicatés qui améliorent la liaison entre les particules. De même, l'hydroxyde de calcium participe à la formation de produits d'hydratation supplémentaires, ce qui densifie localement la matrice.

Selon Mehta et Monteiro (2014), la résistance des matériaux cimentaires dépend non seulement de la quantité de pores, mais aussi de leur taille, de leur distribution et de

leur connectivité. Une porosité fine et homogène est moins pénalisante qu'une porosité grossière et irrégulière. Ainsi, le contrôle du processus d'expansion permet d'obtenir un compromis optimal entre légèreté et résistance.

Par ailleurs, l'oxyde de titane peut contribuer à améliorer les propriétés mécaniques en renforçant la microstructure et en limitant certaines formes de dégradation à long terme. Bien que son rôle principal ne soit pas mécanique, sa présence peut influencer positivement la stabilité du matériau.

En résumé, les additifs chimiques permettent d'ajuster les propriétés mécaniques du béton en jouant sur la microstructure. L'objectif n'est pas d'obtenir une résistance maximale, mais un équilibre entre résistance suffisante et réduction de la masse volumique, adapté aux applications visées (1).

3.5.2 Propriétés thermiques :

L'un des principaux objectifs de l'incorporation d'additifs dans les blocs de béton est l'amélioration des performances thermiques. Le béton traditionnel est un matériau relativement conducteur, ce qui limite son efficacité en tant qu'isolant thermique. En revanche, la création d'une structure poreuse contrôlée permet de réduire significativement la conductivité thermique.

La présence de pores remplis d'air joue un rôle déterminant dans ce processus. L'air étant un mauvais conducteur de chaleur, l'augmentation de la porosité entraîne une diminution des échanges thermiques à travers le matériau. Dans ce contexte, la poudre d'aluminium, en générant une structure cellulaire, constitue un élément clé pour l'amélioration de l'isolation thermique.

Selon Neville (2011), la conductivité thermique du béton est fortement liée à sa densité : plus le matériau est léger, plus sa conductivité thermique est faible. Ainsi, les bétons allégés présentent généralement de meilleures performances thermiques que les bétons conventionnels.

Le contrôle de la taille et de la distribution des pores est également crucial. Une porosité fermée, composée de cellules isolées, est plus efficace pour l'isolation thermique qu'une porosité ouverte, qui peut favoriser la circulation de l'air et donc les transferts de chaleur.

En outre, certains additifs comme le silicate de sodium peuvent contribuer indirectement à l'amélioration thermique en stabilisant la structure poreuse, tandis que l'oxyde de titane peut influencer les propriétés de surface, notamment en réfléchissant partiellement le rayonnement solaire.

Ainsi, l'utilisation d'additifs chimiques permet de transformer le béton en un matériau à meilleure efficacité énergétique, contribuant à la réduction des besoins en chauffage et en climatisation des bâtiments (1).

3.5.3 Résistance à l'humidité :

La résistance à l'humidité constitue un critère essentiel pour la durabilité des matériaux de construction. L'eau peut pénétrer dans la structure du béton à travers les pores et les microfissures, entraînant divers phénomènes de dégradation tels que la fissuration, la corrosion des armatures ou la perte de résistance mécanique.

Dans les bétons allégés, la présence de porosité peut théoriquement augmenter la capacité d'absorption d'eau. Cependant, l'effet réel dépend de la nature de la porosité (ouverte ou fermée) ainsi que de l'action des additifs chimiques.

Le silicate de sodium joue un rôle important dans la réduction de la perméabilité. Il favorise la formation d'une structure plus compacte autour des pores et peut obstruer partiellement les capillaires, limitant ainsi la pénétration de l'eau. De même, l'hydroxyde de calcium participe à la formation de produits secondaires qui peuvent combler les microvides.

Selon Scrivener et al. (2018), la durabilité du béton est fortement liée à sa capacité à limiter le transport des fluides à travers sa microstructure. Une réduction de la connectivité des pores permet d'améliorer la résistance à l'humidité et aux agents agressifs.

L'oxyde de titane, quant à lui, peut améliorer la résistance de surface et réduire l'adhérence des contaminants. Dans certains cas, ses propriétés photocatalytiques contribuent à maintenir des surfaces plus propres, ce qui peut indirectement limiter la pénétration de l'eau et des polluants.

Enfin, la qualité du processus de cure (maturation) joue un rôle déterminant. Un bon traitement de cure permet d'optimiser l'hydratation du ciment et de réduire la formation de fissures, ce qui améliore la résistance globale à l'humidité(56).

Conclusion partielle :

L'analyse de l'influence des additifs chimiques sur les propriétés des blocs de béton montre que ces derniers permettent de modifier en profondeur le comportement du matériau. Bien que l'introduction de porosité puisse entraîner une diminution de la résistance mécanique, elle offre en contrepartie des avantages significatifs en termes d'isolation thermique et de réduction de la masse volumique.

Par ailleurs, l'utilisation combinée d'additifs tels que le silicate de sodium, l'hydroxyde de calcium et l'oxyde de titane permet d'améliorer la durabilité et la résistance à l'humidité, compensant ainsi les effets négatifs potentiels de la porosité.

Ainsi, la formulation étudiée s'inscrit dans une logique d'optimisation globale des propriétés, visant à développer un matériau de construction performant, léger et adapté aux exigences actuelles du secteur du bâtiment.

3.6 Étude comparative avec les techniques existantes (État de l'art) :

L'amélioration des propriétés des matériaux cimentaires, notamment en termes de légèreté, d'isolation thermique et de durabilité, a fait l'objet de nombreuses recherches à l'échelle internationale. Plusieurs techniques ont été développées afin de produire des blocs de béton allégés ou à haute performance. L'objectif de cette section est de situer la formulation proposée dans ce mémoire par rapport aux solutions existantes, en mettant en évidence ses spécificités, ses avantages et ses limites.

➤ Bétons cellulaires autoclavés (AAC)

Les bétons cellulaires autoclavés (Autoclaved Aerated Concrete – AAC) constituent l'une des solutions les plus répandues pour la fabrication de matériaux légers. Leur principe repose sur l'introduction d'un agent générateur de gaz, généralement de la poudre d'aluminium, dans un mélange composé de ciment, de chaux, de sable siliceux et d'eau.

La réaction chimique entre l'aluminium et le milieu alcalin produit de l'hydrogène, entraînant la formation d'une structure poreuse homogène. Après expansion, le matériau est soumis à un traitement en autoclave (haute pression et température), ce qui permet d'améliorer sa résistance mécanique et sa stabilité.

Selon Neville (2011), les bétons AAC présentent une excellente isolation thermique et une faible densité, mais leur procédé de fabrication nécessite des équipements industriels lourds et coûteux, ce qui limite leur accessibilité dans certains contextes.

Comparaison avec la formulation proposée :

- Similitude : utilisation de la poudre d'aluminium comme agent de porosité
- Différence majeure : absence d'autoclavage dans la formulation étudiée
- Avantage de la formulation : procédé plus simple et moins coûteux
- Limite : résistance potentiellement inférieure aux AAC industriels

➤ **Bétons moussés**

Les bétons moussés sont obtenus par incorporation d'une mousse stable dans la pâte cimentaire. Cette mousse est généralement produite à partir d'agents tensioactifs et introduite mécaniquement dans le mélange.

Cette technique permet de contrôler la densité du béton en ajustant la quantité de mousse ajoutée. Les bétons moussés sont particulièrement utilisés pour les applications non structurales, telles que les remplissages ou les isolations.

D'après Mehta et Monteiro (2014), les bétons moussés présentent une bonne isolation thermique, mais leur résistance mécanique reste limitée en raison de la faible cohésion entre les pores.

Comparaison avec la formulation proposée :

- Similitude : présence d'une structure poreuse
- Différence : formation des pores chimique (aluminium) vs mécanique (mousse)
- Avantage de la formulation : meilleure homogénéité des pores
- Avantage supplémentaire : interaction chimique renforçant la matrice

➤ **Utilisation de granulats légers**

Une autre approche consiste à remplacer les granulats traditionnels par des granulats légers tels que l'argile expansée, la perlite ou la pierre ponce. Ces matériaux permettent de réduire la masse volumique du béton tout en conservant une certaine résistance mécanique.

Cependant, cette technique dépend fortement de la disponibilité des matériaux et peut engendrer des coûts supplémentaires. De plus, l'amélioration des propriétés thermiques reste limitée par rapport aux matériaux à structure cellulaire.

Selon Aïtcin (2000), les bétons à granulats légers offrent un bon compromis entre légèreté et résistance, mais ne permettent pas toujours d'atteindre des performances thermiques optimales.

Comparaison avec la formulation proposée :

- Similitude : objectif de réduction de la densité
- Différence : porosité interne (formulation) vs granulats externes
- Avantage de la formulation : meilleure isolation thermique
- Avantage économique : pas besoin de matériaux spéciaux coûteux

➤ **Géopolymères et matériaux alternatifs**

Les géopolymères représentent une alternative écologique aux bétons traditionnels. Ils sont fabriqués à partir de matériaux riches en silice et en alumine, activés par des solutions alcalines.

Ces matériaux présentent une bonne résistance chimique et une empreinte carbone réduite. Toutefois, leur mise en œuvre reste complexe et nécessite une maîtrise précise des conditions de formulation.

Selon Scrivener et al. (2018), les géopolymères offrent des perspectives intéressantes en termes de durabilité, mais leur utilisation à grande échelle reste limitée par des contraintes techniques et économiques.

Comparaison avec la formulation proposée :

- * Similitude : utilisation de milieux alcalins (silicate de sodium)
- * Différence : nature du liant (géopolymère vs ciment Portland)
- * Avantage de la formulation : simplicité et compatibilité avec les pratiques existantes
- * Limite : impact environnemental du ciment

➤ **Matériaux à base de déchets recyclés**

Plusieurs études récentes se sont orientées vers l'utilisation de déchets de construction (béton recyclé, poudre de brique, etc.) pour produire des matériaux écologiques. Ces approches visent à réduire l'impact environnemental du secteur du bâtiment.

Par exemple, certaines recherches utilisent des solutions de silicate de sodium pour activer des matériaux recyclés et produire des blocs de construction.

Cependant, ces matériaux peuvent présenter une variabilité importante en termes de qualité et nécessitent des traitements spécifiques.

Comparaison avec la formulation proposée :

- * Similitude : utilisation du silicate de sodium
- * Différence : matières premières recyclées vs formulation contrôlée
- * Avantage de la formulation : meilleure reproductibilité
- * Limite : moins orientée vers le recyclage

➤ **Apport spécifique de la formulation proposée**

La formulation étudiée dans ce mémoire se distingue par plusieurs aspects innovants :

- * Combinaison de plusieurs additifs chimiques dans une proportion optimisée
- * Utilisation simultanée d'un agent de porosité (aluminium) et d'un stabilisateur (silicate de sodium)
- * Intégration de l'oxyde de titane, apportant une valeur fonctionnelle supplémentaire
- * Procédé de fabrication simple, sans recours à des équipements industriels lourds

Contrairement aux techniques classiques, cette approche ne se limite pas à un seul mécanisme d'amélioration, mais repose sur une synergie entre plusieurs phénomènes physico-chimiques. Cette combinaison permet d'obtenir un matériau équilibré, répondant à plusieurs exigences simultanément : légèreté, isolation thermique, résistance acceptable et durabilité.

➤ **Synthèse comparative**

Technique	Avantages	Inconvénients
Béton AAC	Excellente isolation	Coût élevé, autoclave
Béton moussés	Facilité de production	Faible résistance
Granulats légers	Bonne résistance	Isolation limitée
Géopolymères	Écologique	Complexité
Formulation proposée	Équilibre global	Technologie à valider

3.7 Conclusion :

Ce chapitre a permis d'analyser en profondeur l'effet des additifs chimiques sur les propriétés des blocs de béton, en mettant l'accent sur la formulation innovante proposée. À travers l'étude des différents composants, de leurs mécanismes d'action et de leur

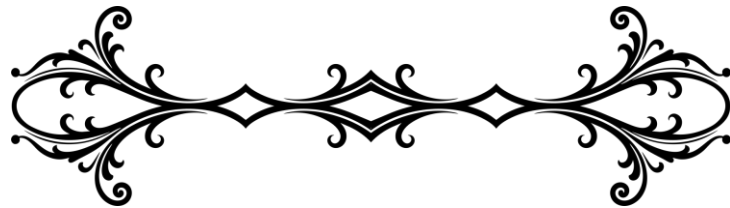
influence sur les performances du matériau, il apparaît clairement que l'intégration contrôlée d'additifs constitue une approche efficace pour améliorer les caractéristiques du béton.

L'analyse détaillée des constituants a montré que chaque élément de la formulation joue un rôle spécifique et complémentaire. Le ciment assure la cohésion et la résistance mécanique, tandis que l'eau permet l'hydratation et la mise en œuvre du mélange. L'hydroxyde de calcium crée un environnement alcalin favorable aux réactions chimiques, notamment celles impliquant la poudre d'aluminium, qui génère une porosité interne responsable de l'allègement du matériau. Le silicate de sodium contribue à la stabilisation de la structure poreuse et à l'amélioration de la compacité, alors que l'oxyde de titane apporte une valeur ajoutée en termes de durabilité et de performance de surface.

L'étude de l'influence des additifs sur les propriétés mécaniques, thermiques et de résistance à l'humidité a permis de mettre en évidence un compromis essentiel entre légèreté et performance. Bien que l'introduction de porosité puisse entraîner une diminution de la résistance mécanique, elle offre en contrepartie une amélioration significative des propriétés thermiques, ce qui constitue un avantage majeur dans le contexte actuel de recherche d'efficacité énergétique.

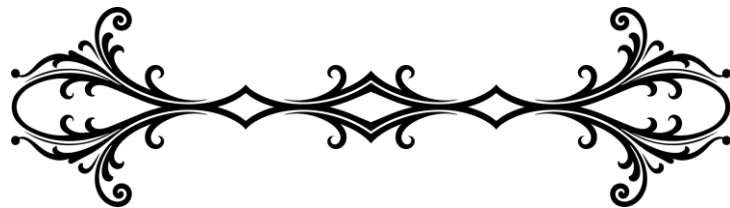
Par ailleurs, la comparaison avec les techniques existantes a montré que la formulation proposée se distingue par sa simplicité de mise en œuvre, l'absence de procédés industriels lourds tels que l'autoclavage, et l'intégration d'additifs innovants comme l'oxyde de titane. Cette approche permet d'obtenir un matériau équilibré, capable de répondre à plusieurs exigences simultanées, notamment la réduction de la masse volumique, l'amélioration de l'isolation thermique et le renforcement de la durabilité.

Ainsi, ce chapitre met en évidence le potentiel des additifs chimiques comme outils d'optimisation des matériaux cimentaires. Il constitue une base théorique solide pour la suite du travail, notamment pour l'étude expérimentale et l'évaluation de la faisabilité économique du projet. Les résultats présentés ouvrent la voie au développement de blocs de béton innovants, adaptés aux besoins du secteur du bâtiment et aux enjeux environnementaux actuels.



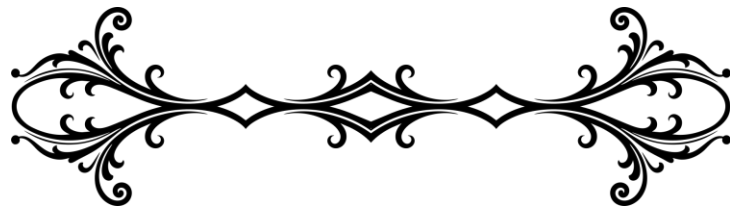
Chapitre 4 :

Étude de faisabilité et projet entrepreneurial

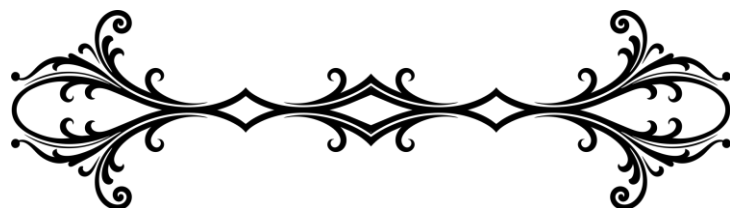


ECO BRICK





En coordination avec l'incubateur d'entreprises de l'Université Mohamed Boudiaf de M'Sila, et sous la supervision du Professeur Rahmouni Zine El Abidine, ce mémoire a été transformé en une idée de projet sous le nom de l'entreprise EcoBrick.



4.1 Présentation du projet :

Dans un contexte marqué par une croissance démographique soutenue et une demande accrue en logements et en infrastructures, le secteur du bâtiment en Algérie représente un levier stratégique de développement économique. Toutefois, ce secteur est confronté à plusieurs défis majeurs, notamment le coût élevé des matériaux, la faible performance énergétique des constructions et l'impact environnemental lié à l'utilisation intensive des ressources naturelles.

Parallèlement, la problématique de la gestion des déchets, en particulier les déchets plastiques, constitue un enjeu environnemental de plus en plus préoccupant. L'accumulation de ces déchets, souvent non valorisés, entraîne des conséquences négatives sur les écosystèmes et la qualité de vie. Dans ce contexte, l'intégration des principes de l'économie circulaire dans le secteur du bâtiment apparaît comme une solution innovante et durable.

C'est dans cette double logique — amélioration des matériaux de construction et valorisation des déchets — que s'inscrit le projet entrepreneurial EcoBrike. Cette entreprise vise à développer et commercialiser des produits de construction innovants, à la fois performants sur le plan technique et respectueux de l'environnement. Le projet repose sur une approche industrielle combinant innovation technologique et valorisation des ressources locales.

L'activité principale de l'entreprise consiste en la fabrication de blocs de béton allégés (hourdis), élaborés à partir d'une formulation chimique optimisée permettant d'améliorer les propriétés mécaniques, thermiques et de résistance à l'humidité. Ce produit constitue une solution adaptée aux exigences actuelles du secteur du bâtiment, notamment en matière d'efficacité énergétique et de réduction des charges structurelles.

En complément de cette activité, l'entreprise EcoBrike prévoit la production d'un second produit : les pavés (pavés autobloquants) à base de plastique recyclé. Ce choix stratégique permet non seulement de diversifier la gamme de produits, mais également de s'inscrire dans une démarche écologique en valorisant les déchets plastiques.

➤ Présentation du produit secondaire : les pavés en plastique recyclé

Les pavés en plastique recyclé représentent une alternative innovante aux pavés traditionnels en béton. Ils sont fabriqués à partir de déchets plastiques collectés, triés et transformés par un procédé thermique permettant leur fusion et leur mise en forme.

Le processus de fabrication de notre pavé écologique repose sur un dosage précis des matériaux pour garantir une résistance optimale. Chaque unité est conçue avec une

masse totale de 1600g, composée à 70% de sable (soit 1120g), servant de liant structurel. Les 30% restants sont constitués d'un mélange de polymères recyclés, répartis comme suit : 20% de PEHD (Polyéthylène Haute Densité) et 10% de PP (Polypropylène). Ce mélange est chauffé et malaxé jusqu'à obtention d'une pâte homogène, puis pressé dans des moules spécifiques pour créer un produit final alliant durabilité et respect de l'environnement.

Ce procédé permet de transformer un déchet polluant en un produit utile et commercialisable, contribuant ainsi à la réduction de l'impact environnemental.

➤ **Propriétés des pavés en plastique recyclé**

Les pavés fabriqués à partir de plastique recyclé présentent plusieurs avantages techniques :

Légèreté : plus légers que les pavés en béton, facilitant le transport et la pose

Résistance à l'eau : le plastique étant hydrophobe, les pavés ne absorbent pas l'humidité

Durabilité : bonne résistance aux conditions climatiques et à la corrosion

Flexibilité : meilleure résistance aux fissures par rapport aux matériaux rigides

Résistance chimique : insensibilité à de nombreux agents chimiques

Selon certaines études récentes sur les matériaux recyclés, les composites à base de plastique peuvent présenter une résistance mécanique suffisante pour des applications telles que les trottoirs, les zones piétonnes et les aménagements urbains.

➤ **Avantages environnementaux**

L'intégration des pavés en plastique recyclé dans le projet EcoBrike présente plusieurs bénéfices environnementaux :

- Réduction des déchets plastiques dans l'environnement
- Diminution de l'utilisation des ressources naturelles (sable, gravier)
- Réduction des émissions de CO₂ liées à la production de ciment
- Promotion de l'économie circulaire

Cette approche permet de transformer un problème environnemental en opportunité économique, en créant une valeur ajoutée à partir de déchets

➤ **Positionnement stratégique du projet EcoBrike**

Le choix de combiner deux produits — les blocs hourdis innovants et les pavés recyclés — confère à l'entreprise EcoBrike un positionnement stratégique unique sur le marché. D'une part, elle propose un matériau de construction amélioré répondant aux besoins techniques du secteur du bâtiment. D'autre part, elle offre une solution écologique pour la gestion des déchets plastiques.

Cette double activité permet :

- De diversifier les sources de revenus
- De réduire les risques économiques
- De répondre à des marchés différents (construction et aménagement urbain)
- D'attirer des partenaires institutionnels et environnementaux

4.2 Étude de marché :

L'étude de marché constitue une étape essentielle dans l'évaluation de la viabilité d'un projet entrepreneurial, notamment dans le secteur du bâtiment, qui représente un domaine stratégique en Algérie. Dans le cadre du projet EcoBrike, cette étude vise à analyser en profondeur l'environnement économique, les besoins du marché, la concurrence existante ainsi que les opportunités de développement pour les deux produits proposés : les blocs de béton allégés (hourdis) et les pavés en plastique recyclé.

4.2.1 Analyse du secteur du bâtiment en Algérie :

Le secteur du bâtiment et des travaux publics (BTP) en Algérie est considéré comme l'un des moteurs principaux de l'économie nationale. Il bénéficie d'un soutien important de l'État à travers des programmes de logement et d'infrastructures.

Selon l'Office National des Statistiques (ONS), le secteur du BTP contribue à hauteur d'environ 12 % du produit intérieur brut (PIB) algérien (ONS, Rapport annuel, 2022). Cette contribution reflète l'importance de la demande en matériaux de construction.

Par ailleurs, le Ministère de l'Habitat, de l'Urbanisme et de la Ville indique que plusieurs millions de logements ont été réalisés dans le cadre de programmes publics au cours des dernières années, notamment les programmes AADL et LPA (Ministère de l'Habitat, Rapport sectoriel, 2021). Cette dynamique crée une demande continue en matériaux tels que les blocs de béton et les éléments de plancher.

Cependant, ce secteur est confronté à plusieurs contraintes :

- Hausse des coûts des matériaux (ciment, acier)
- Problèmes liés à l'efficacité énergétique des bâtiments

- Besoin croissant en solutions innovantes et durables

Ces défis ouvrent la voie à l'introduction de matériaux alternatifs, notamment les blocs allégés et les produits issus du recyclage.

4.2.2 Besoins du marché :

Le marché algérien présente un besoin réel en matériaux de construction améliorés, répondant à plusieurs critères :

a) Besoin en matériaux légers :

Les entreprises de construction recherchent des matériaux plus légers afin de :

- Réduire les charges sur les structures
- Faciliter le transport et la mise en œuvre
- Diminuer les coûts de construction

Les blocs hourdis traditionnels étant relativement lourds, l'introduction de blocs allégés constitue une solution pertinente.

b) Besoin en isolation thermique :

Avec l'augmentation des coûts énergétiques, la question de l'efficacité énergétique des bâtiments devient primordiale. Selon l'Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Énergie (APRUE), le secteur du bâtiment représente près de 40 % de la consommation énergétique totale en Algérie (APRUE, 2020).

Cela met en évidence l'importance de matériaux offrant une meilleure isolation thermique, tels que les blocs poreux proposés par EcoBrike.

c) Besoin en solutions écologiques :

La gestion des déchets plastiques est un problème majeur. Selon le Ministère de l'Environnement, l'Algérie produit plus de 13 millions de tonnes de déchets par an, dont une part significative est constituée de plastique (Ministère de l'Environnement, Rapport national, 2021).

Cependant, le taux de recyclage reste faible, ce qui crée une opportunité pour les projets valorisant ces déchets, comme les pavés en plastique recyclé.

4.2.3 Concurrences :

a) Concurrence directe (blocs de béton) :

La production de blocs de béton en Algérie est dominée par des entreprises locales et des unités artisanales. Ces producteurs proposent principalement des blocs traditionnels, sans innovation notable en termes de performance thermique ou de légèreté.

L'absence de différenciation technologique constitue une opportunité pour EcoBrike, qui peut se positionner comme une entreprise innovante.

b) Concurrence indirecte :

Les produits concurrents incluent :

- Béton cellulaire importé (AAC)
- Matériaux isolants (polystyrène, laine de roche)
- Pavés en béton classiques

Ces solutions présentent certaines limites :

- Coût élevé pour les matériaux importés
- Impact environnemental important
- Performance limitée dans certains cas

c) Concurrence dans le recyclage plastique

Le secteur du recyclage en Algérie reste peu structuré. Selon un rapport de la Banque Mondiale (World Bank, 2022), moins de 10 % des déchets plastiques sont recyclés.

Cela signifie que le marché des pavés recyclés est encore largement ouvert, avec peu de concurrence structurée.

➤ Segmentation du marché

Le marché cible du projet EcoBrike peut être segmenté comme suit :

- Entreprises de construction (BTP)
- Promoteurs immobiliers
- Collectivités locales (aménagement urbain)
- Particuliers

Les blocs hourdis s'adressent principalement aux entreprises de construction, tandis que les pavés recyclés ciblent les collectivités locales et les projets d'aménagement urbain.

➤ **Opportunités et tendances du marché**

Plusieurs tendances favorisent le développement du projet EcoBrike :

- Orientation vers des constructions durables
- Encouragement des startups via les incubateurs universitaires
- Politiques publiques de gestion des déchets
- Sensibilisation croissante à l'environnement

Selon le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (UNEP, 2021), l'économie circulaire représente une opportunité majeure pour les pays en développement, notamment dans le secteur du bâtiment.

➤ **Analyse de la demande potentielle**

La demande en matériaux de construction est directement liée à la croissance du secteur du logement. En Algérie, la demande reste élevée en raison :

- De la croissance démographique
- De l'urbanisation
- Des programmes étatiques

Concernant les pavés, la demande est liée aux projets d'aménagement urbain (routes, trottoirs, espaces publics), qui sont en expansion dans plusieurs wilayas.

➤ **Conclusion de l'étude de marché**

L'analyse du marché montre que le projet EcoBrike s'inscrit dans un environnement favorable, caractérisé par une forte demande en matériaux de construction et un besoin croissant en solutions innovantes et écologiques.

Les blocs de béton allégés répondent aux exigences techniques du secteur du bâtiment, tandis que les pavés en plastique recyclé apportent une solution durable à la problématique des déchets.

Ainsi, le projet présente un potentiel réel de développement, notamment grâce à son positionnement innovant et à la faible intensité concurrentielle dans le domaine du recyclage.

4.3 Description du procédé de fabrication :

Le procédé de fabrication constitue un élément central dans l'évaluation de la faisabilité technique du projet (EcoBrike). Il permet de décrire de manière détaillée les différentes étapes nécessaires à la production des deux produits proposés par l'entreprise, à savoir les blocs de béton allégés (hourdis) et les pavés en plastique recyclé. L'objectif est de démontrer que ces procédés sont techniquement réalisables, maîtrisables à l'échelle semi-industrielle, et compatibles avec les moyens disponibles dans un contexte local.

➤ Procédé de fabrication des blocs de béton allégés (hourdis)

La fabrication des blocs allégés repose sur une formulation chimique spécifique issue du brevet étudié, combinée à un procédé de mélange et de cure adapté pour garantir la formation d'une structure poreuse stable.

a) Préparation des matières premières

Les matières premières utilisées sont :

- Ciment
- Eau
- Hydroxyde de calcium
- Silicate de sodium liquide
- Poudre d'aluminium
- Oxyde de titane

Chaque composant est dosé selon des proportions précises afin d'assurer la reproductibilité du produit final et la maîtrise des propriétés physico-chimiques .

b) Mélange initial

Dans une première étape, l'eau est mélangée avec le ciment et l'hydroxyde de calcium pendant environ 2 minutes. Cette phase permet d'initier l'hydratation du ciment et de créer un milieu alcalin homogène favorable aux réactions ultérieures.

Après ce mélange, une courte période de repos (environ 15 secondes) est observée afin de stabiliser la pâte.

c) Introduction des additifs réactifs

Le silicate de sodium liquide et la poudre d'aluminium sont ensuite ajoutés au mélange. Cette étape est cruciale, car elle déclenche la réaction chimique responsable de la formation de gaz (hydrogène).

Le mélange est maintenu pendant environ 2 minutes afin d'assurer une bonne dispersion des additifs et une réaction homogène dans toute la masse.

d) Ajout de l'oxyde de titane

L'oxyde de titane est introduit en dernier lieu et mélangé pendant environ 1,5 minute. Cette étape permet de garantir une distribution uniforme de cet additif dans la matrice.

e) Moulage et expansion

Le mélange est ensuite versé dans des moules adaptés à la forme des hourdis. Immédiatement après le moulage, une expansion se produit sous l'effet du gaz généré par la réaction de l'aluminium.

Cette expansion entraîne la formation d'une structure poreuse interne, caractéristique des matériaux allégés.

f) Durcissement (cure)

Après 24 heures, les blocs sont démoulés et soumis à un processus de cure par humidification régulière pendant plusieurs jours (environ 4 jours).

Cette étape est essentielle pour :

- Assurer l'hydratation complète du ciment
- Stabiliser la structure poreuse
- Améliorer la résistance mécanique

Le produit final est alors prêt à être utilisé.

➤ Procédé de fabrication des pavés en plastique recyclé

La production des pavés recyclés repose sur un procédé de transformation thermique des déchets plastiques, permettant de valoriser ces matériaux en produits utiles pour l'aménagement urbain.

a) Collecte et tri des déchets plastiques

Les déchets plastiques sont collectés à partir de différentes sources :

- Décharges
- Centres de tri
- Collecte locale

Ils sont ensuite triés selon leur nature (polyéthylène, polypropylène, etc.) afin d'assurer une qualité homogène du produit final.

b) Nettoyage et séchage

Les déchets sont lavés pour éliminer les impuretés (terre, poussière, matières organiques), puis séchés afin d'éviter toute altération du processus de fusion.

c) Broyage

Les plastiques sont broyés en petites particules à l'aide d'un broyeur industriel. Cette étape facilite leur fusion et améliore l'homogénéité du mélange.

d) Fusion thermique

Les particules de plastique sont introduites dans une machine de chauffage (extrudeuse ou four), où elles sont chauffées à une température comprise généralement entre 150°C et 250°C, selon le type de plastique.

Sous l'effet de la chaleur, le plastique fond et devient malléable.

e) Moulage

Le matériau fondu est ensuite versé dans des moules métalliques ayant la forme des pavés (pavés autobloquants, pavés décoratifs, etc.).

Une pression peut être appliquée afin d'assurer une bonne compaction et une finition de surface adéquate.

f) Refroidissement et solidification

Les moules sont laissés à refroidir à température ambiante ou dans un système de refroidissement contrôlé. Le plastique se solidifie progressivement, formant un pavé rigide et durable.

➤ Organisation de la production

Dans une unité de production EcoBrike, les deux lignes de fabrication peuvent être organisées de manière complémentaire :

- Ligne 1 : production de blocs de béton allégés
- Ligne 2 : production de pavés recyclés

Cette organisation permet :

- Une diversification des produits

- Une optimisation de l'utilisation des ressources
- Une meilleure rentabilité globale

➤ **Avantages du procédé**

Les procédés proposés présentent plusieurs avantages :

- Simplicité de mise en œuvre
- Adaptation à une production locale
- Faible besoin en équipements lourds (pour les hourdis)
- Valorisation des déchets plastiques
- Réduction des coûts de production

4.4 Étude économique :

L'étude économique du projet EcoBrike vise à évaluer la rentabilité potentielle de l'entreprise à travers une estimation réaliste des coûts d'investissement, des charges d'exploitation et des revenus attendus, en se basant sur le contexte du marché algérien. Cette analyse repose sur des données approximatives mais cohérentes avec la réalité économique nationale, tout en intégrant les cadres réglementaires définis par la législation algérienne.

➤ **Cadre réglementaire et références légales**

La création d'une entreprise industrielle en Algérie s'inscrit dans un cadre juridique défini par plusieurs textes réglementaires.

Selon la Loi n° 22-18 relative à l'investissement (Journal Officiel de la République Algérienne n° 50, 2022), l'État encourage les projets innovants et les startups à travers des avantages fiscaux et parafiscaux, notamment :

- Exonération de l'impôt sur le bénéfice des sociétés (IBS) pendant une période pouvant aller jusqu'à 3 ans
- Exonération de la taxe sur l'activité professionnelle (TAP)
- Réduction des droits de douane pour l'importation d'équipements

De plus, le Décret exécutif n° 20-254 (Journal Officiel n° 55, 2020) relatif au statut de startup prévoit un accompagnement spécifique via les incubateurs universitaires et les dispositifs d'aide à l'innovation.

Ces mesures constituent un levier important pour réduire les charges initiales du projet EcoBrike.

➤ **Estimation de l'investissement initial**

L'investissement initial comprend l'ensemble des coûts nécessaires au lancement de l'activité.

a) Équipements pour blocs hourdis

- Malaxeur industriel : ~ 600 000 DA
- Moules métalliques : ~ 300 000 DA
- Table vibrante : ~ 400 000 DA
- Espace de cure et stockage : ~ 500 000 DA

Total estimé : ~ 1 800 000 DA

b) Équipements pour pavés recyclés

- Broyeur plastique : ~ 800 000 DA
- Four ou extrudeuse : ~ 1 200 000 DA
- Moules pavés : ~ 300 000 DA
- Système de refroidissement : ~ 200 000 DA

Total estimé : ~ 2 500 000 DA

c) Autres coûts

- Aménagement local : ~ 500 000 DA
- Frais administratifs : ~ 100 000 DA
- Transport et installation : ~ 200 000 DA

Total : ~ 800 000 DA

Investissement total estimé :

≈ 5 100 000 DA

➤ **Coûts de production mensuels**

a) Matières premières (approximation marché algérien)

- Ciment (50 kg ≈ 800 DA, Journal Officiel – prix indicatif encadré)
- Hydroxyde de calcium
- Silicate de sodium
- Aluminium en poudre

- Déchets plastiques (faible coût, parfois gratuit)

Coût mensuel estimé : $\approx 800\,000$ DA

b) Main-d'œuvre

- ouvriers : $35\,000 \text{ DA} \times 3 = 105\,000 \text{ DA}$
- 1 technicien : $50\,000 \text{ DA}$
- 1 gérant : $60\,000 \text{ DA}$

Total : $\approx 215\,000 \text{ DA}$

c) Charges diverses

- Électricité : $\sim 80\,000 \text{ DA}$
- Eau : $\sim 10\,000 \text{ DA}$
- Maintenance : $\sim 40\,000 \text{ DA}$

Total : $\approx 130\,000 \text{ DA}$

Total charges mensuelles :

$\approx 1\,145\,000 \text{ DA}$

➤ **Estimation de la production et du chiffre d'affaires**

a) Production mensuelle

- Hourdis : $100 \text{ unités / jour} \rightarrow 2\,500 \text{ unités / mois}$
- Pavés : $200 \text{ unités / jour} \rightarrow 5\,000 \text{ unités / mois}$

b) Prix de vente (marché algérien)

- Hourdis : $\sim 400 \text{ DA / unité}$
- Pavé recyclé : $\sim 150 \text{ DA / unité}$

c) Chiffre d'affaires

- Hourdis : $2\,500 \times 400 = 1\,000\,000 \text{ DA}$
- Pavés : $5\,000 \times 150 = 750\,000 \text{ DA}$

Chiffre d'affaires total : $\approx 1\,750\,000 \text{ DA / mois}$

➤ **Analyse de rentabilité**

- Chiffre d'affaires : $1\,750\,000 \text{ DA}$

- Charges : 1 145 000 DA

Bénéfice mensuel estimé : ≈ 605 000 DA

Cela correspond à une rentabilité intéressante pour une petite unité industrielle.

Délai de récupération (ROI)

- Investissement : 5 100 000 DA
- Bénéfice mensuel : 605 000 DA

Temps de retour ≈ 8 à 10 mois

➤ **Analyse économique globale**

Le projet EcoBrike présente plusieurs avantages économiques :

- Faible coût des matières premières (notamment plastique recyclé)
- Diversification des produits
- Demande forte sur le marché
- Soutien de l'État aux startups

Cependant, certains risques doivent être pris en compte :

- Fluctuation des prix des matériaux
- Concurrence locale
- Besoin de sensibilisation du marché aux produits innovants

4.5 Analyse SWOT :

L'analyse SWOT constitue un outil stratégique permettant d'évaluer la position d'un projet entrepreneurial en identifiant ses forces (Strengths), ses faiblesses (Weaknesses), ainsi que les opportunités (Opportunities) et les menaces (Threats) présentes dans son environnement. Dans le cadre du projet EcoBrike, cette analyse permet d'apprécier les facteurs internes et externes susceptibles d'influencer la réussite de l'entreprise.

Cette méthode est largement utilisée dans les études de faisabilité et les plans d'affaires, car elle permet d'avoir une vision globale du projet et d'anticiper les défis potentiels (Kotler & Keller, Marketing Management, 2016).

➤ **Forces du projet (Strengths)**

Les forces représentent les avantages internes du projet EcoBrike qui lui permettent de se démarquer sur le marché.

Innovation technologique :

Le projet repose sur une formulation innovante de blocs de béton allégés intégrant plusieurs additifs chimiques, permettant d'améliorer les propriétés mécaniques et thermiques du matériau. Cette innovation constitue un avantage concurrentiel par rapport aux blocs traditionnels utilisés dans le secteur du bâtiment.

Double production industrielle :

L'entreprise prévoit la fabrication de deux produits complémentaires :

- Blocs de béton allégés (hourdis)
- Pavés fabriqués à partir de plastique recyclé

Cette diversification permet de réduire les risques économiques et d'élargir les marchés ciblés.

Approche écologique :

La valorisation des déchets plastiques pour la fabrication des pavés s'inscrit dans une logique d'économie circulaire et de développement durable. Cette orientation écologique peut favoriser l'acceptation du produit sur le marché et attirer des partenaires institutionnels.

Faible coût des matières premières :

Certaines matières premières utilisées, notamment les déchets plastiques, sont peu coûteuses ou parfois disponibles gratuitement, ce qui réduit les coûts de production.

Soutien institutionnel :

Le projet peut bénéficier des dispositifs d'accompagnement des startups en Algérie, notamment à travers les incubateurs universitaires et les programmes de soutien à l'innovation (Décret exécutif n°20-254, Journal Officiel n°55, 2020).

➤ Faiblesses du projet (Weaknesses)

Les faiblesses correspondent aux limitations internes qui peuvent freiner le développement du projet.

Manque d'expérience industrielle :

En tant que startup émergente, EcoBrike peut être confrontée à un manque d'expérience dans la gestion industrielle et commerciale.

Capacité de production limitée :

Au début de l'activité, la capacité de production restera relativement modeste comparée aux grandes entreprises du secteur des matériaux de construction.

Investissement initial :

Bien que l'investissement initial soit relativement modéré pour une activité industrielle, il peut représenter un obstacle pour de jeunes entrepreneurs nécessitant un financement externe.

Sensibilisation du marché :

Les produits innovants, notamment les pavés en plastique recyclé, peuvent nécessiter un effort de sensibilisation pour convaincre les clients de leur fiabilité et de leur durabilité.

➤ **Opportunités du marché (Opportunités)**

Les opportunités représentent les facteurs externes favorables pouvant soutenir le développement du projet.

Croissance du secteur du bâtiment :

Le secteur du BTP en Algérie connaît une demande importante en matériaux de construction en raison de la croissance démographique et des programmes de logement initiés par l'État (ONS, Rapport économique, 2022).

Développement de l'économie circulaire :

Les politiques environnementales encouragent de plus en plus la valorisation des déchets et le recyclage, ce qui constitue une opportunité pour la production de pavés en plastique recyclé.

Soutien aux startups :

L'État algérien encourage la création d'entreprises innovantes à travers plusieurs dispositifs.

Statut startup :

Incubateurs universitaires

Aides financières et fiscales

Ces mécanismes peuvent faciliter le lancement et la croissance du projet.

Sensibilisation environnementale croissante :

La prise de conscience des enjeux environnementaux favorise l'acceptation de matériaux écologiques et recyclés dans le secteur de la construction.

➤ **Menaces potentielles (Threats)**

Les menaces correspondent aux facteurs externes susceptibles de représenter un risque pour le projet.

Concurrence locale :

Le marché des matériaux de construction est déjà occupé par de nombreuses entreprises produisant des blocs de béton traditionnels à faible coût.

Fluctuation des prix des matières premières :

Les prix de certains matériaux, notamment le ciment et les additifs chimiques, peuvent varier en fonction du marché, ce qui peut influencer les coûts de production.

Contraintes réglementaires :

La mise sur le marché de nouveaux matériaux peut nécessiter des certifications techniques ou des normes spécifiques, ce qui peut ralentir l'introduction du produit.

Acceptation du marché :

Les entreprises de construction peuvent être réticentes à adopter de nouveaux matériaux tant que leur performance n'est pas largement démontrée.

<u>Forces</u>	<u>Faiblesses</u>
Innovation technologique	Expérience industrielle limitée
Double gamme de produits	Capacité de production initiale faible
Approche écologique	Investissement initial
Coût réduit des matières premières	Sensibilisation du marché nécessaire
<u>Opportunités</u>	<u>Menaces</u>
Croissance du secteur BTP	Concurrence locale
Soutien aux startups	Fluctuation des prix
Développement de l'économie circulaire	Contraintes réglementaires
Sensibilisation environnementale	Adoption progressive du marché

4.6 Perspectives de développement du projet :

Les perspectives de développement du projet EcoBrike s'inscrivent dans une vision stratégique à moyen et long terme, visant à assurer la croissance durable de l'entreprise, renforcer sa compétitivité sur le marché et élargir son impact économique et environnemental. En s'appuyant sur une base technologique innovante et une double activité (blocs allégés et pavés recyclés), le projet présente un potentiel d'évolution significatif dans plusieurs directions.

➤ Développement de la capacité de production

Dans une première phase, l'entreprise EcoBrike fonctionnera avec une capacité de production limitée adaptée à une startup. Toutefois, à moyen terme, une augmentation progressive de la capacité de production est envisagée afin de répondre à la demande croissante du marché.

Cette évolution peut passer par :

- L'acquisition de nouvelles machines
- L'automatisation partielle du processus de fabrication
- L'extension des installations de production

L'objectif est de passer d'une production artisanale ou semi-industrielle à une production industrielle optimisée, permettant de réduire les coûts unitaires et d'améliorer la rentabilité.

➤ **Diversification des produits**

Le développement futur du projet inclut l'élargissement de la gamme de produits afin de répondre à des besoins variés du secteur du bâtiment et de l'aménagement urbain.

Parmi les pistes envisagées :

- Production de blocs isolants spécialisés
- Fabrication de panneaux légers pour cloisons
- Développement de pavés décoratifs ou colorés
- Introduction de produits composites (plastique + sable)

Cette diversification permettra à EcoBrike de se positionner comme un acteur polyvalent dans le domaine des matériaux de construction innovants.

➤ **Innovation et recherche & développement (R&D)**

L'innovation constitue un axe stratégique majeur pour la pérennité du projet. Le développement de nouvelles formulations et l'amélioration continue des produits existants permettront de renforcer la compétitivité de l'entreprise.

Les actions possibles incluent :

- Collaboration avec des laboratoires universitaires
- Tests expérimentaux pour optimiser les formulations
- Développement de nouveaux additifs ou procédés
- Amélioration des performances mécaniques et thermiques

Selon le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique, l'intégration de la recherche dans les projets entrepreneuriaux est un facteur clé de succès pour les startups innovantes en Algérie (MESRS, 2021).

➤ **Expansion géographique**

Après une phase de consolidation au niveau local (wilaya de M'sila et régions voisines), EcoBrike pourra envisager une expansion vers d'autres régions du territoire national.

Cette expansion peut se faire à travers :

- La création de nouvelles unités de production
- La mise en place d'un réseau de distribution
- Des partenariats avec des entreprises locales

À long terme, une ouverture vers les marchés internationaux (notamment en Afrique) peut être envisagée, en fonction de la compétitivité du produit.

➤ **Intégration dans l'économie circulaire**

Le projet EcoBrike s'inscrit pleinement dans une logique d'économie circulaire. À l'avenir, l'entreprise pourra renforcer cet aspect en :

- Augmentant la capacité de recyclage des déchets plastiques
- Collaborant avec des organismes de collecte
- Sensibilisant les citoyens à la valorisation des déchets
- Développant des partenariats avec les collectivités locales

Selon le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (UNEP, 2021), l'intégration des déchets dans les processus industriels constitue une opportunité majeure pour réduire l'impact environnemental tout en créant de la valeur économique.

➤ **Développement de partenariats stratégiques**

Le succès du projet EcoBrike dépendra également de sa capacité à établir des partenariats solides avec différents acteurs :

- Universités et centres de recherche
- Entreprises du secteur du BTP
- Collectivités locales
- Organismes de financement

Ces partenariats permettront de faciliter l'accès aux ressources, d'améliorer la visibilité du projet et d'accélérer son développement.

➤ **Intégration dans les dispositifs de soutien à l'entrepreneuriat**

Le projet pourra bénéficier des dispositifs existants en Algérie, notamment :

- Incubateurs universitaires
- Agence Nationale d'Appui et de Développement de l'Entrepreneuriat (ANADE)
- Fonds de soutien aux startups

Ces mécanismes offrent un accompagnement technique, financier et administratif, favorisant la réussite des projets innovants.



Chapitre 5 :

Partie expérimentale et réalisation pratique



5.1 Introduction :

Après avoir présenté les fondements théoriques relatifs aux matériaux cimentaires, aux additifs chimiques et à leurs effets sur les propriétés des blocs de béton, il apparaît nécessaire de passer à une phase expérimentale permettant de concrétiser les concepts étudiés et de vérifier leur applicabilité dans des conditions réelles de fabrication.

Cette partie pratique représente une étape essentielle du projet EcoBrike, puisqu'elle permet d'évaluer la faisabilité technique du procédé proposé à travers la réalisation expérimentale de deux produits : des blocs de béton allégés (hourdis) améliorés par additifs chimiques, ainsi que des pavés fabriqués à partir de déchets plastiques recyclés.

L'objectif principal de cette étude expérimentale est d'observer l'influence réelle des différents composants utilisés dans la formulation sur le comportement du matériau obtenu, notamment en termes de masse volumique, de structure poreuse, de résistance apparente et d'aspect général du produit final. Elle vise également à démontrer la possibilité de produire localement des matériaux innovants à faible coût, compatibles avec les exigences actuelles du secteur du bâtiment et les principes du développement durable.

La réalisation pratique des hourdis repose sur un procédé de fabrication inspiré de la formulation étudiée précédemment, intégrant plusieurs additifs chimiques tels que l'hydroxyde de calcium, le silicate de sodium, la poudre d'aluminium et le dioxyde de titane. L'interaction entre ces composants permet de générer une porosité contrôlée au sein du matériau, contribuant à son allègement et à l'amélioration de ses propriétés thermiques.

Parallèlement, la fabrication des pavés recyclés s'inscrit dans une démarche environnementale visant à valoriser les déchets plastiques à travers leur transformation en produits utilisables dans les aménagements urbains. Cette approche permet non seulement de réduire l'impact écologique des déchets, mais également de proposer une alternative économique aux pavés conventionnels.

Ce chapitre présentera ainsi les différents matériaux et équipements utilisés, les étapes détaillées de fabrication des deux produits, ainsi que les principales observations et résultats obtenus lors des essais expérimentaux. L'ensemble de cette étude permettra d'établir un lien direct entre l'approche théorique développée dans les chapitres précédents et son application concrète dans un contexte réel de production.

5.2 Procédé de fabrication des hourdis :

Étape 1 : Fabrication du moule :

Avant le lancement du procédé de fabrication des blocs de béton allégés, une étape préliminaire a été consacrée à la réalisation du moule utilisé pour le coulage du mélange expérimental. Cette étape est essentielle, car elle permet d'obtenir des dimensions régulières et une forme adaptée au produit final.

Le moule a été fabriqué à partir de matériaux métalliques afin d'assurer une bonne résistance mécanique et une stabilité lors du remplissage et du démoulage. Les dimensions du moule ont été choisies en fonction de la forme souhaitée des hourdis réalisés dans cette étude.

La fabrication du moule a comporté plusieurs opérations, notamment :

- Découpe des plaques métalliques
- Assemblage des différentes parties
- Soudage de la structure
- Vérification de l'alignement et des dimensions

Une attention particulière a été portée à l'étanchéité du moule afin d'éviter les pertes du mélange pendant le coulage.



Figure 1 : Découpe des plaques métalliques



Figure 2 : Assemblage des différentes parties et Soudage

Étape 2 : Préparation des matériaux

Les différents composants utilisés dans la formulation ont été préparés et dosés selon les proportions expérimentales définies auparavant.



Figure 3 : Préparation de l'eau

Ensuite, nous préparons et pesons les ingrédients restants.



Figure 4 : les composants

Étape 3 : Mélange du ciment, eau et Ca(OH)_2

Le ciment, l'eau et l'hydroxyde de calcium ont été mélangés pendant environ 2 minutes afin d'obtenir une pâte homogène et alcaline.



Figure 5 : Préparation



Figure 6 : Malaxage pendant environ 2 minutes

Étape 4 : Ajout du silicate de sodium, aluminium et TiO_2

Le silicate de sodium et la poudre d'aluminium ont été incorporés progressivement afin de déclencher la réaction génératrice de porosité.



Figure 7 : Ajout du silicate de sodium, aluminium et TiO_2

Étape 5 : Coulage dans les moules

Après l'obtention d'un mélange homogène, le coulage a été effectué progressivement dans les moules préparés auparavant. Le mélange a été versé lentement depuis plusieurs directions afin d'assurer une répartition uniforme à l'intérieur du moule.

Un vibrage mécanique a ensuite été appliqué afin d'éviter le phénomène de ségrégation et de limiter la présence des vides dans le matériau.

Après le remplissage des moules, un gonflement progressif du mélange a été observé sous l'effet de la réaction chimique génératrice de porosité. Les échantillons ont ensuite été laissés au repos pendant environ 24 heures avant le démoulage des blocs obtenus.

Étape 6 : Démoulage et séchage



Figure 8 : Produit final

5.3 Fabrication des pavés recyclés :

La fabrication des pavés en plastique recyclé s'inscrit dans une démarche de valorisation des déchets et de développement durable. Cette partie expérimentale vise à transformer les déchets plastiques en un matériau utile pour les aménagements urbains, tout en réduisant l'impact environnemental lié à l'accumulation des déchets non biodégradables.

Le procédé adopté repose sur plusieurs étapes successives comprenant la collecte des déchets plastiques, leur préparation, leur fusion thermique puis leur moulage sous forme de pavés.

Remarque : Du plastique Masterbash a été utilisé dans le mélange pour lui donner une couleur esthétique.

Étape 1 : Pesage du sable et du plastique

Dans une première étape, les quantités de sable et de plastique ont été pesées selon les proportions définies pour la formulation expérimentale. Cette opération permet d'assurer l'homogénéité du mélange et la reproductibilité du produit final.

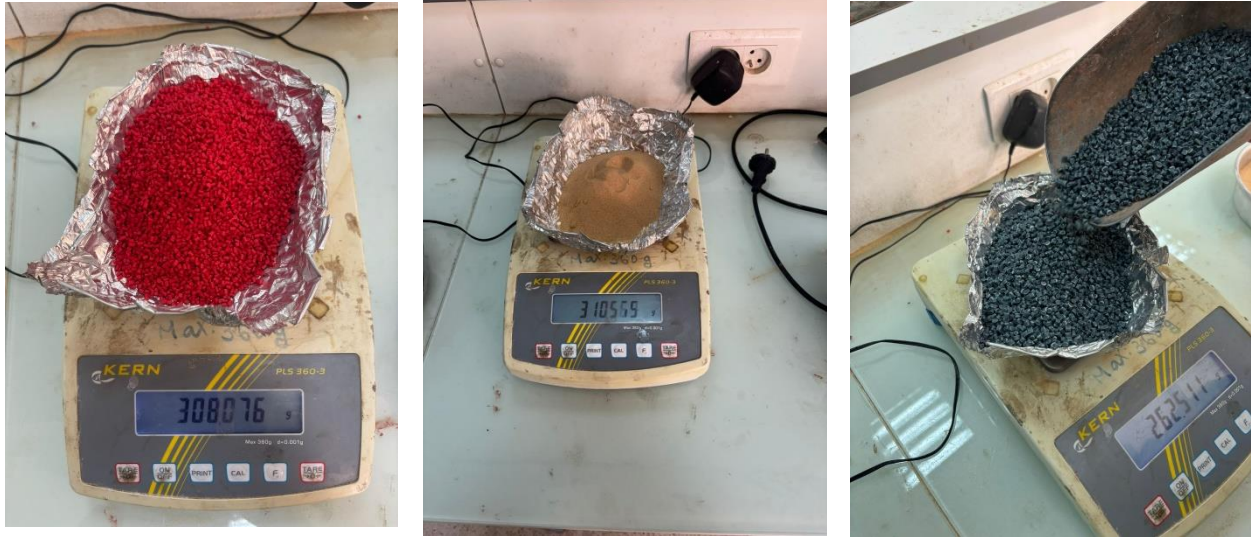


Figure 9 : Pesage du sable et du plastique



Figure 10 : Mélanger du plastique avec du sable

Étape 2 : Préparation du moule

Le moule destiné à recevoir le mélange a été préparé avant le début du procédé de fabrication afin de faciliter le moulage et le démoulage du pavé après compactage.



Figure 11 : Préparation du moule

Étape 3 : Introduction du sable et du plastique dans l'extrudeuse

Le sable et les déchets plastiques ont ensuite été introduits dans la machine d'extrusion (extrudeuse). Sous l'effet de la chaleur et du malaxage mécanique, le plastique fond progressivement et se mélange au sable pour former une pâte homogène.



Figure 12: Mélanger du plastique avec du sable

Étape 4 : Sortie du mélange

Après fusion et homogénéisation, le mélange obtenu est sorti de l'extrudeuse puis introduit directement dans le moule préparé auparavant.



Figure 13: Sortie du mélange

Étape 5 : Compactage du mélange

Le matériau placé dans le moule a ensuite été compacté afin d'améliorer la cohésion interne du pavé et de réduire les vides pouvant affecter sa résistance mécanique.



Figure 14 : Compactage du mélange

Étape 6 : Produit final

Après refroidissement et solidification, le pavé obtenu présentait une forme homogène et une rigidité satisfaisante. Le produit final constitue une alternative écologique aux pavés conventionnels grâce à l'utilisation de déchets plastiques recyclés.



Figure 15 : Produit final

5.4 Observations et résultats expérimentaux :

La phase expérimentale réalisée dans le cadre du projet EcoBrike a permis d'observer plusieurs phénomènes liés au comportement des matériaux utilisés ainsi qu'aux propriétés des produits obtenus après fabrication. Les observations effectuées concernent principalement les blocs de béton allégés (hourdis) et les pavés fabriqués à partir de plastique recyclé.

➤ 5.4.1 Observations relatives aux blocs de béton :

Au cours des différentes étapes de fabrication des hourdis, plusieurs modifications physiques ont été observées après l'introduction des additifs chimiques dans le mélange cimentaire.

L'ajout de la poudre d'aluminium dans le milieu alcalin a provoqué une réaction chimique accompagnée d'un gonflement progressif du mélange. Cette réaction a entraîné l'apparition d'une structure poreuse visible après durcissement du matériau.

Les blocs obtenus présentaient une masse relativement réduite par rapport aux blocs traditionnels, ce qui indique une diminution de la densité du matériau grâce à la formation des pores internes.

Par ailleurs, la texture des échantillons fabriqués semblait plus légère et moins compacte, tout en conservant une cohésion satisfaisante après séchage. L'utilisation du silicate de sodium a également contribué à améliorer l'homogénéité de la matrice cimentaire.

Concernant l'aspect thermique, les observations qualitatives ont montré que les blocs fabriqués semblaient moins conducteurs de chaleur que les blocs classiques, ce qui peut être expliqué par la présence d'air emprisonné dans les pores internes.

➤ 5.4.2 Observations relatives aux pavés recyclés :

La fabrication des pavés en plastique recyclé a permis d'obtenir un matériau relativement homogène après refroidissement et solidification du mélange plastique-sable.

Au cours du chauffage dans l'extrudeuse, le plastique a progressivement fondu et s'est mélangé au sable de manière satisfaisante, formant une pâte compacte facile à mouler.

Après compactage et refroidissement, les pavés obtenus présentaient :

Une bonne rigidité globale

Une surface relativement homogène

Une résistance satisfaisante à l'humidité

Une masse plus légère que certains pavés conventionnels

Aucune fissuration importante n'a été observée après le démoulage, ce qui indique une bonne cohésion du mélange utilisé.

➤ **5.4.3 Analyse générale des résultats :**

Les résultats obtenus lors des essais expérimentaux montrent que les procédés adoptés sont techniquement réalisables et compatibles avec une production locale à petite ou moyenne échelle.

L'utilisation des additifs chimiques dans les blocs hourdis a permis d'obtenir :

- Une structure poreuse contrôlée
- Une amélioration potentielle de l'isolation thermique

De même, la valorisation des déchets plastiques dans la fabrication des pavés a démontré la possibilité de produire un matériau alternatif à faible impact environnemental.

Ces résultats confirment l'intérêt de l'approche développée dans ce mémoire, qui associe innovation technique et démarche écologique dans le domaine des matériaux de construction.

5.5 Discussion des résultats :

Les résultats obtenus lors de la phase expérimentale permettent de confirmer l'influence significative des additifs chimiques et des matériaux recyclés sur les propriétés des produits développés dans le cadre du projet EcoBrike. L'analyse des observations réalisées met en évidence plusieurs phénomènes physico-chimiques expliquant le comportement des matériaux obtenus.

➤ **5.5.1 Discussion des résultats relatifs aux blocs de béton allégés :**

Les observations effectuées lors de la fabrication des hourdis ont montré que l'ajout de la poudre d'aluminium dans le milieu alcalin constitué par l'hydroxyde de calcium a provoqué une réaction chimique génératrice de gaz. Cette réaction a entraîné la formation d'une structure poreuse interne responsable de l'allègement du matériau.

La présence de ces pores explique directement la réduction de la masse volumique observée sur les blocs fabriqués. En effet, l'air emprisonné dans la matrice cimentaire

diminue la densité globale du matériau, ce qui rejoint les principes théoriques des bétons cellulaires présentés dans les chapitres précédents.

Par ailleurs, cette structure poreuse contribue également à l'amélioration des propriétés thermiques. Les pores remplis d'air agissent comme des barrières limitant le transfert de chaleur à travers le matériau, ce qui peut améliorer les performances énergétiques des bâtiments utilisant ce type de blocs.

Cependant, la présence excessive de porosité peut également entraîner une diminution de la résistance mécanique. Cela confirme l'existence d'un compromis entre légèreté et résistance, largement évoqué dans les études scientifiques sur les matériaux cimentaires allégés.

Le silicate de sodium a joué un rôle important dans la stabilisation de la matrice cimentaire et dans l'amélioration de l'homogénéité du mélange. De son côté, l'oxyde de titane semble avoir contribué à améliorer la qualité globale du matériau, notamment au niveau de la cohésion et de la stabilité de surface.

Ainsi, les résultats expérimentaux obtenus sont cohérents avec les mécanismes théoriques étudiés précédemment concernant l'action des additifs chimiques dans les matériaux cimentaires.

➤ **5.5.2 Discussion des résultats relatifs aux pavés recyclés :**

Les pavés fabriqués à partir de plastique recyclé ont présenté une bonne cohésion après refroidissement, ce qui montre que le procédé de fusion thermique adopté permet une liaison correcte entre le plastique fondu et les particules de sable.

La rigidité observée sur les pavés peut être expliquée par le rôle du sable, qui agit comme renforcement granulaire à l'intérieur du matériau composite. Le plastique fondu joue quant à lui le rôle de liant assurant la cohésion de l'ensemble.

L'absence de forte absorption d'eau observée lors des essais s'explique par le caractère hydrophobe du plastique utilisé. Cette propriété constitue un avantage important par rapport à certains matériaux classiques sensibles à l'humidité.

De plus, la valorisation des déchets plastiques dans la fabrication de pavés représente une solution environnementale intéressante, permettant de réduire l'accumulation des déchets non biodégradables tout en créant un produit utile dans le domaine des aménagements urbains.

Toutefois, certaines limites peuvent être mentionnées, notamment :

- La nécessité d'un contrôle précis de la température de fusion
- La variabilité possible des déchets plastiques utilisés
- L'absence d'essais mécaniques normalisés dans cette étude préliminaire

➤ **5.5.3 Analyse globale du projet EcoBrike :**

Les résultats obtenus dans cette étude montrent que l'approche adoptée par le projet EcoBrike présente un potentiel réel dans le domaine des matériaux de construction innovants.

L'association entre :

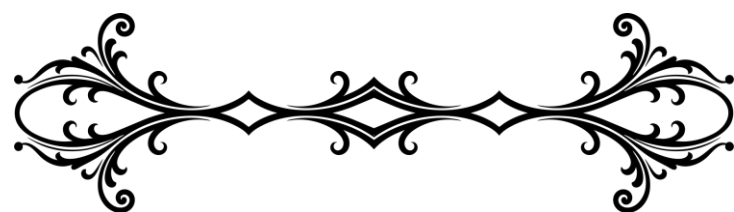
- amélioration des blocs cimentaires,
- réduction de la masse volumique,
- valorisation des déchets plastiques,
- et logique entrepreneuriale,

Constitue une approche cohérente répondant aux enjeux actuels du secteur du bâtiment et du développement durable.

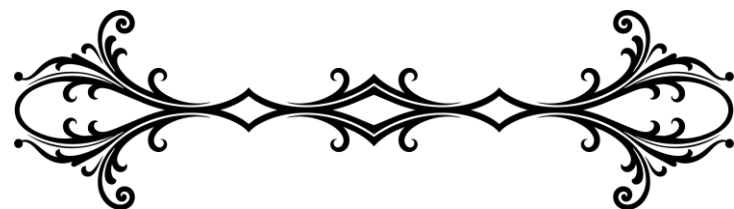
Le projet démontre également qu'il est possible de développer des solutions locales à faible coût en utilisant des procédés relativement simples et des matières premières accessibles.

Enfin, les observations réalisées ouvrent des perspectives intéressantes pour des travaux futurs portant sur :

- l'optimisation des formulations,
- la réalisation d'essais mécaniques normalisés,
- l'étude de la durabilité à long terme,
- et le développement industriel des produits.



Conclusion générale



Conclusion générale

Ce travail de recherche et d'innovation s'est inscrit à la croisée de l'ingénierie des matériaux avancés et de l'entrepreneuriat durable, avec pour ambition de répondre aux défis majeurs du secteur du bâtiment en Algérie : l'efficacité énergétique, l'allègement des structures et la valorisation des déchets. À travers une démarche alliant théorie, expérimentation et modélisation économique, ce mémoire a posé les fondations solides de la micro-entreprise EcoBrick.

Sur le plan scientifique et technique, l'étude expérimentale a validé la faisabilité d'une formulation chimique innovante pour les blocs de béton (hourdis). L'incorporation synergique de la poudre d'aluminium en milieu alcalin (hydroxyde de calcium) a permis de générer une porosité contrôlée, réduisant significativement la masse volumique du matériau tout en améliorant ses capacités d'isolation thermique. L'ajout de silicate de sodium a garanti la stabilisation de cette matrice cellulaire, tandis que l'intégration du dioxyde de titane (TiO_2) a conféré au produit final une valeur ajoutée en termes de cohésion et de durabilité de surface. Ces résultats prouvent qu'il est possible de transcender les limites des hourdis classiques—notamment leur poids excessif et leur conductivité thermique élevée—pour aboutir à un compromis optimal entre légèreté, résistance et performance énergétique.

Parallèlement, la dimension écologique et circulaire du projet a été concrétisée par le développement d'un second produit technique : les pavés écologiques. En substituant le ciment par des polymères recyclés (PEHD et PP, à hauteur de 30%) mélangés à du sable (70%), nous avons réussi à formuler un éco-matériau hydrophobe, rigide et durable. Ce procédé de fusion thermique offre une solution industrielle viable à la problématique de l'accumulation des déchets plastiques, transformant un passif environnemental en un actif urbanistique à forte valeur ajoutée.

Sur le plan entrepreneurial, l'étude de faisabilité a démontré que la micro-entreprise EcoBrick repose sur un modèle économique viable et hautement rentable. Portée par la disponibilité et le faible coût des matières premières locales (notamment les déchets plastiques), ainsi que par un besoin avéré du marché algérien en matériaux de construction modernes, l'entreprise affiche un délai de récupération de l'investissement (ROI) estimé entre 8 et 10 mois. Le positionnement stratégique sur deux lignes de production complémentaires—l'une destinée au bâtiment et l'autre à l'aménagement urbain—permet de diversifier les revenus tout en minimisant les risques financiers.

En définitive, ce mémoire dépasse le cadre de la simple recherche académique pour s'imposer comme un véritable projet industriel et commercial. EcoBrick incarne la

transition vers une construction algérienne résiliente et écoresponsable, en parfaite adéquation avec les objectifs de développement durable et l'économie circulaire.

Pour consolider cet élan et assurer la pérennité de l'entreprise, les perspectives futures s'orienteront vers :

- L'industrialisation et l'optimisation : L'automatisation partielle du processus de production pour passer d'une échelle semi-industrielle à une production de masse capable de répondre à une demande à grande échelle.
- La certification et la normalisation : La réalisation d'essais mécaniques et thermiques poussés par des laboratoires agréés pour valider définitivement les normes de sécurité et obtenir les certifications nationales requises pour les marchés publics.
- L'expansion de la gamme de produits : L'exploration de nouvelles formulations composites et la diversification des produits préfabriqués, tels que les panneaux légers pour cloisons ou les pavés décoratifs.

Ainsi, soutenue par les structures d'incubation universitaires, EcoBrick est aujourd'hui prête à transformer l'innovation de laboratoire en un standard de construction incontournable sur le marché algérien.

Références:

- (1) Neville, 2011
- (2) NF EN 771-3 (AFNOR, 2012)
- (3) Eurocode 2, 2004
- (4) NF EN 13369, 2013
- (5) Adapté de fib Model Code 2010
- (6) DTU 21.1, 2010
- (7) NF EN 12390-5
- (8) Lafarge, 2020
- (9) CSTB, 2018
- (10) MSH, 2022
- (11) norme NA 562
- (12) CNAE, 2021
- (13) NF EN 13501-2
- (14) NF EN 772
- (15) NF P18-406
- (16) NF EN 772-1
- (17) NF EN 12390-6
- (18) NF EN 772-13
- (19) NF EN 772-11
- (20) NF EN 772-17
- (21) CSTB, 2021 ; MSH, 2022
- (22) NF EN 12602
- (23) Etude de l'influence de la pouzzolane naturelle sur la résistance mécanique des mortiers à base de ciments composés O.Chaib , M.Mouli , M.Hanifi , M.Hamadache , S.Benosman et F.Dif
- (24) APRUE – *Guide de l'efficacité énergétique dans le bâtiment en Algérie*
- (25) European Commission
- (26) NF EN 206/CN
- (27) données normalisées NF EN 206
- (28) CSTB Algérie : Rc résiduel 85% après séisme simulé 0,3g
- (29) classes AAC2 à AAC7 selon NF EN 771-4
- (30) ZAMBON_AGNES_2018.pdf
- (31) réduction inertie 70%, essais CGS Alger 2025
- (32) NF EN 13055, ACI 211.2
- (33) hourdis pouzzolane Sétif (Lafarge pilote 2024)

- (34) FKS-Informationsblatt-Feuerloeschschaume_FR_3-0_2025.pdf
- (35) ZINGG_2013_archivage.pdf
- (36) Neville 2011, Properties of Concrete 5th ed., chap.5 p.234-248
- (37) Neville 2011 chap.10 p.456 ; Nambiar & Ramamurthy 2007, "Foamed concrete: Mix proportions and properties", Cem. Conc. Comp. vol.29 p.349-362
- (38) Narayan & Ramamurthy 2000, "Structure and properties of aerated concrete: Review", Cem. Conc. Comp. vol.22 p.321-329 ; ACI 523.3R 1993 p.12-18
- (39) Neville 2011, chap.6 p.312-328 ; Holm 2005, "Guide to structural lightweight concrete", ACI 213R p.22-29
- (40) Neville 2011 chap.11 p.512 ; fib 2013 Model Code vol.2 p.234-248
- (41) Neville 2011, "Properties of Concrete", 5e éd., chap.12 p.567-598
- (42) EN 1745 thermique
- (43) Mehta & Monteiro, 2014
- (44) Aïtcin, 2000
- (45) Mindess et al., 2003
- (46) Scrivener et al., 2018
- (47) 2020BOUKHELF171314B.pdf
- (48) Présentée et soutenue publiquement le 11 juin 2019 Par Guillaume PISKORSKI Né le 3 octobre à Dechy – France MÉDICAMENT INTRACANALAIRE EN ENDODONTIE : HYDROXYDE DE CALCIUM ET CHLORHEXIDINE
- (49) Etude des caractéristiques des poudres à base d'aluminium pour leur adaptation à la projection dynamique à froid " Cold Spray ",Hugo Durand
- (50) Romain Mathieu. Solubilité du sodium dans les liquides silicatés. Sciences de la Terre. Institut National Polytechnique de Lorraine - INPL, 2009. Français. <NNT : >. <tel-00446879
- (51) Marwa Hamandi. Élaboration et caractérisation d'oxydes de Titane de Morphologie Contrôlée : application à la Photodégradation de Polluants Organiques. Autre. Université de Lyon; Université de Tunis El Manar, 2017. Français. <NNT : 2017LYSE1077>. <tel-01769552>
- (52) Taylor 1997, Cement Chemistry chap.8 p.240-265
- (53) Neville 2011, chap.12 p.572-580 ; Narayan 2000, Cem. Conc. Comp. vol.22 p.324
- (54) Taylor 1997 chap.9 p.290-305
- (55) Neville 2011 chap.16 p.792 ; EP3274315B1 cité fiche section 3
- (56) Zeineb Kesentini. Influence de l'humidité sur le comportement en statique et en dynamique d'un composite PLA/Lin. Mécanique des matériaux [physics.class-ph]. Le Mans Université; École nationale d'ingénieurs de Sfax (Tunisie), 2022. Français. <NNT : 2022LEMA1043>. <tel-04001957>

