



Formulation et caractérisation hygrothermique et physico-mécanique d'un béton biosourcé à base de balle du riz

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR 2iE AVEC GRADE DE
MASTER

SPÉCIALITÉ : Génie Civil – Bâtiment et Travaux Publics

Présenté et soutenu publiquement le 22/07/2025 par

TAGNE DJIKE Christian (20220281)

Directeur de mémoire : Pr Adamah MESSAN, Professeur Titulaire, Enseignant-chercheur,
Institut 2iE

Encadrant : Dr Philbert NSHIMIYIMANA, Maitre-Assistant, Enseignant-chercheur, Institut 2iE

Structure d'accueil : Laboratoire Eco-Matériaux et Habitats Durables (LEMHaD), Institut 2iE

Jury d'évaluation du mémoire :

Président : Dr Abdou LAWANE GANA

Membres et correcteurs : Dr Césaire HEMA

Dr Decroly DJOUBISSIE DENOUWE

Promotion [2024/2025]

DÉDICACE

À la recherche, qui m'a appris à questionner. À la passion, qui m'a empêché d'abandonner et au courage, sans lequel ce mémoire ne serait qu'une idée parmi tant d'autres.

À ma famille du Cameroun et vous ma famille du Burkina Faso que le Seigneur m'a donné

CITATION

<<Tant que l'Afrique ne racontera pas sa propre histoire scientifique, elle vivra dans l'ombre des autres.>>

Achille Mbembe

REMERCIEMENTS

Si l'on semble seul face au jury, c'est parce que la force de ceux qui nous soutiennent agit en silence. Famille, amis, encadreurs pédagogiques, camarades de route : votre appui constant m'a porté jusqu'ici. Je vous adresse ma plus sincère gratitude

Je pense spécialement :

- À la Direction Générale de l'Institut 2iE, le corps enseignant et au personnel administratif, pour leur dévouement et engagement exceptionnel au cours de notre formation.
- Au Professeur Adamah MESSAN, Responsable de laboratoire LEMHAD, Directeur de ce mémoire, votre sagesse, votre charisme, la justesse de vos conseils et votre immense patience m'ont profondément marqué. Que Dieu continue de vous éclairer et de vous accompagner.
- Au Docteur Philbert NSHIMIYIMANA, Encadrant de ce mémoire, pour vos exigences du travail de qualité demeure pour moi une véritable source d'inspiration. Je vous remercie sincèrement pour votre patience et votre accompagnement tout au long de cette expérience.
- Monsieur Georges KIBALO TCHAMIE, doctorant au LEMHAD dont le souci du travail bien fait m'a profondément inspiré. Votre patience et votre soutien ont été précieux tout au long de cette expérience.
- À l'ensemble des docteurs et doctorants du LEMHAD, votre appui constant et votre bienveillance ont grandement contribué à la réussite de mon parcours. Je vous en suis profondément reconnaissant.
- À mes parents Mr et Mme DJIKE, merci de m'avoir toujours soutenu et d'être mes protecteurs lorsque je suis faible. Soyez immensément béni ;
- À mes frères Joël, Bernard, mes sœurs Eunice, Maheva, Sorelle et à toute la famille TAGNE de par le monde
- À ma famille du Burkina Faso : Maman Sanon, maman Damaris, maman Michelle, papa Gomna, papa Rodrigues, papa Gaëlle, tonton Brice etc. Je vous dit merci pour votre soutien et vos conseils
- À ma famille 2iE et Grace Académique tellement nombreux, mes frères de guerre KABOBI, Hans, Fortuney, kramos, Gaston ;

-
- Je ne saurai t'oublier toi Marielle WANGRAOUA merci pour tout le soutien et les moyens que tu m'as apporté au quotidien ;
 - À mes collègues de stage, BAMBARAS porphyre, CISSE Mohamed, AZAHIROU Adamou, ANAGUE Daryl, NGASSAM Jude, NKEMDEM De Rossia, AGORO Amir.

RESUMÉ

Face aux enjeux croissants du changement climatique, le Burkina Faso doit relever d'importants défis en matière de construction durable et de valorisation des ressources locales. Cette étude s'inscrit dans cette dynamique, en explorant l'intégration de la balle de riz, un résidu agricole abondant comme matériau alternatif dans des formulations de béton. L'objectif est de substituer partiellement le sable par la balle de riz à différents taux (25 %, 50 %, 75 % et 100 %), afin de proposer une solution locale, accessible et respectueuse de l'environnement. Pour en évaluer la faisabilité, plusieurs analyses ont été menées sur les propriétés physiques, mécaniques et hygrothermiques des bétons élaborés. Sur le plan physique, les formulations présentent une masse volumique variant de 1385 kg/m³ à 444 kg/m³, et une porosité évoluant de 35,5 % à 65,4 %, traduisant une structure interne plus légère et plus ouverte avec l'augmentation du taux de balle. Ces caractéristiques influencent directement la capacité du matériau à gérer l'humidité et les transferts de chaleur. Du point de vue mécanique, la formulation contenant 25 % de balle de riz a montré les meilleures performances, avec des résistances maximales de 1,75 MPa en flexion et 4,12 MPa en compression, des niveaux adaptés à des applications non porteuses ou d'éléments de remplissage. Les propriétés thermiques et hygrothermiques ont été évaluées à travers des mesures de conductivité thermique, effusivité et diffusivité. Une valeur minimale de conductivité thermique de 0,090 W/m·°C a été obtenue pour un béton 100 % balle de riz dosé à 250 kg/m³, indiquant un bon potentiel isolant. Par ailleurs, les analyses de perméabilité à la vapeur et de sorption/désorption ont confirmé une meilleure régulation hygrométrique du matériau. Les résultats montrent que l'ajout de balle de riz permet d'obtenir un béton plus léger, mieux isolant, tout en conservant une résistance suffisante pour certains usages. Cette approche met en évidence le potentiel de la balle de riz comme ressource locale renouvelable, adaptée aux réalités climatiques et économiques du Burkina Faso

Mots clés :

- 1- Béton biosourcé,
- 2- Balle de riz,
- 3- Résistance mécanique,
- 4- Perméabilité à la vapeur,
- 5- Propriétés hygrothermiques.

ABSTRACT

In response to the growing challenges of climate change, Burkina Faso faces major issues related to sustainable construction and the efficient use of local resources. This study explores the use of rice husk, an abundant agricultural by-product, as an alternative material in concrete mixtures. The objective is to partially replace sand with rice husk at varying substitution rates (25%, 50%, 75%, and 100%) to develop a low-cost, eco-friendly, and locally sourced building solution. To evaluate this approach, the research focused on the physical, mechanical, and hygrothermal performance of the rice husk-based concretes. The physical analysis shows that increasing the rice husk content significantly reduces the density (from 1385 kg/m³ to 444 kg/m³) and increases the porosity (from 35.5% to 65.4%), resulting in lighter, more porous materials. Mechanically, the best performance was achieved with 25% rice husk, reaching 1.75 MPa in flexural strength and 4.12 MPa in compressive strength, suitable for non-structural elements and filling applications. In terms of thermal behavior, the lowest thermal conductivity measured was 0.090 W/m·°C for a concrete containing 100% rice husk and 250 kg/m³ of cement, indicating excellent insulation potential. Additional measurements of vapor permeability and moisture sorption/desorption confirm the material's ability to regulate indoor humidity levels. Overall, the results highlight the technical feasibility and environmental benefits of incorporating rice husk in concrete. This approach offers a renewable, low-impact alternative that aligns with the realities of the Sahelian region, promoting agricultural waste valorization and sustainable building practices tailored to local needs.

Keywords:

- 1- Bio-based concrete,
- 2- Rice husk,
- 3- Mechanical strength,
- 4- Vapor permeability,
- 5- Hygrothermal behavior

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	i
CITATION.....	ii
REMERCIEMENTS	iii
RESUMÉ.....	v
ABSTRACT	vi
TABLE DES MATIÈRES	vii
LISTE DES ABRÉVIATIONS.....	x
LISTES DES TABLEAUX	xi
LISTES DES FIGURES.....	xii
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
CHAPITRE I. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIE.....	3
I.1. Introduction	3
I.2. Présentation générale	4
I.3. Composition et formulation.....	4
I.3.1. Granulats végétaux	5
I.3.2. Liant minéral	5
I.3.3. Eau.....	5
I.4. Propriétés mécaniques et masse volumique	7
I.5. Comportement thermique	8
I.6. Régulation hygrométrique	9
I.7. Durabilité et sensibilité aux conditions extérieures.....	11
I.8. Impact environnemental et potentiel de valorisation locale	12
I.9. Conclusion partielle.....	13
CHAPITRE II. MATÉRIAUX ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES	14
II.1. Introduction	14

II.2.	Matériaux de base et leurs caractéristiques	14
II.2.1.	Balle de riz	14
II.2.2.	Sable	15
II.2.3.	Ciment	16
II.3.	Méthode expérimentale	17
II.4.	Caractérisation des matériaux	18
II.4.1.	Analyse granulométrique par tamisage	18
II.4.2.	Densités	18
II.4.3.	Formulation et confection des bétons	19
II.4.4.	Essais de caractérisation physique des bétons	21
II.4.5.	Essais de caractérisation mécaniques des bétons	24
II.4.6.	Essais de caractérisation thermiques des bétons	26
II.4.7.	Essais de caractérisation hygrothermiques des bétons	28
II.5.	Conclusion partielle	30
CHAPITRE III. RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS		32
III.1.	Introduction	32
III.2.	Caractéristiques de la matière première	32
III.2.1.	Composition granulaire	32
III.2.2.	Absorption d'eau	34
III.2.3.	Densité	34
III.3.	Propriétés physiques des bétons	34
III.3.1.	Masse volumique	35
III.3.2.	Absorption capillaire à l'eau	36
III.3.3.	Porosité accessible à l'eau	38
III.4.	Propriétés mécaniques	40
III.4.1.	Résistance en flexion	40
III.4.2.	Resistance à la compression	43

III.5.	Propriétés thermiques.....	45
III.5.1.	Conductivité thermique	45
III.5.2.	Diffusivité thermique.....	46
III.5.3.	Effusivité thermique	48
III.6.	Propriétés hygrométriques	49
III.6.1.	perméabilité à la vapeur.....	49
III.6.2.	Sorption	51
III.7.	Conclusion partielle	54
CONCLUSION GÉNÉRALE		55
BIBLIOGRAPHIE		56

LISTE DES ABRÉVIATIONS

- ACV : Analyse de cycle de vie
- BBr : béton balle de riz
- C : Celsius
- C_a : Coefficient d'absorption capillaire
- CO₂ : Gaz carbonique
- e : effusivité thermique
- J : joule
- MBV : Moisture Buffer Value
- NFP : norme française /produit
- NHL : Natural hydraulique line
- ODD : objectifs de développement durable
- Sr : sable de rivière
- u : absorption de la vapeur
- ρ : masse volumique
- λ : conductivité thermique
- σ_c : résistance à la compression
- ε : porosité
- α : diffusivité thermique
- δ : perméabilité à la vapeur
- μ : facteur de résistance

LISTES DES TABLEAUX

Tableau I. 1 : formulations de bétons biosourcés et de leurs résultats obtenus.....	6
Tableau I. 2 : Caractéristiques des mélanges balles de riz – sable étudiés.....	8
Tableau I. 3 : L'influence de la masse volumique sur les propriétés thermique [3]	9
Tableau I. 4 : Récapitulatifs des différents essais thermiques en fonction des humidités relatives.....	9
Tableau II. 1: liste des différents essaies avec les moyens d'acquisitions.....	19
Tableau II. 2: Dosage en ciment 250 kg/m³	20
Tableau II. 3 : Dosage en ciment 300 kg/m³	20
Tableau II. 4 : Dosage en ciment 350 kg/m³	20
Tableau II. 5 : Caractéristiques des balles de riz.....	34
Tableau II. 6 : Caractéristiques du sable.....	34

LISTES DES FIGURES

Figure 1 : Isothermes de sorption/désorption d'un échantillon de béton de chanvre (b) valeurs de MBV des bétons de chanvres du béton cellulaires et de la brique [10].....	11
Figure 2 : balle de riz	15
Figure 3 : sable de rivière	16
Figure 4 : Ciment.....	16
Figure 5 : Moule + béton de balle de riz.....	21
Figure 6: Echantillons immergés	21
Figure 7 : Dispositif de pesé hygroscopique.....	23
Figure 8 : Dispositif d'absorption capillaire	24
Figure 9 : Essais de flexion sur un échantillon avec la 3R.....	25
Figure 10 : Essais de compression sur un échantillon avec la 3R	26
Figure 11 : Sonde à fil chaud pour mesurer des propriétés thermiques.....	27
Figure 12 : échantillon dans le dessiccateur pour essai de sorption	29
Figure 13 : Essai de perméabilité à la vapeur.....	30
Figure 14 : Courbe granulométrique des balles de riz.....	33
Figure 15: Courbe granulométrique du sable	33
Figure 16 : courbe cinétique d'absorption d'eau des balles de riz	33
Figure 17 : Masse volumique apparente des bétons de balle de riz.....	35
Figure 18 : coefficient d'absorption C 300 kg.....	37
Figure 19 : coefficient d'absorption C 350 kg.....	37
Figure 20 : coefficient d'absorption C 250kg.....	38
Figure 21 : porosité accessible à l'eau.....	40
Figure 22 : résistance à la flexion.....	42
Figure 23 : résistance à la flexion.....	42
Figure 24 : résistance à la compression	44

Figure 25 : résistance à la compression	44
Figure 26 : Conductivité thermique.....	46
Figure 27 : Diffusivité thermique.....	47
Figure 28 : effusivité thermique	49
Figure 30 : Facteur de résistance	51
Figure 29 : Perméabilité à la vapeur d'eau	51
Figure 31 : Humidité relative (0-97%) pour béton dosé à 350 kg/m³	53
Figure 32 : Humidité relative (0-97%) pour béton dosé à 250 kg/m³	53

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le changement climatique n'est plus une menace hypothétique ou lointaine. Il constitue aujourd'hui une réalité tangible, dont les effets bouleversent profondément nos sociétés, nos modes de vie et nos ressources naturelles. Dans ce contexte d'urgence environnementale, le secteur de la construction apparaît comme l'un des principaux domaines interpellés, en raison de son empreinte écologique particulièrement lourde.

Selon les travaux d'Edward [1], le secteur du bâtiment serait responsable de près de 50 % des émissions mondiales de dioxyde de carbone. À cette contribution directe au réchauffement climatique s'ajoutent des impacts indirects, mais tout aussi préoccupants, comme l'érosion des littoraux causée par l'exploitation massive du sable marin à des fins de construction. Ces phénomènes traduisent une réaction manifeste de la nature face à une exploitation excessive et souvent non régulée de ses ressources.

Face à cette situation, il devient impératif de repenser nos priorités et de fixer de nouveaux objectifs ancrés dans une logique de durabilité. Le concept de villes et communautés durables, tel que défini par les objectifs de développement durable (ODD), implique une reconsidération globale des pratiques actuelles de construction. Cela englobe non seulement des dimensions techniques et économiques, mais aussi des enjeux culturels, sociaux et environnementaux. Sur le plan humain, cela se traduit par un appel à une conscience collective quant aux impacts de nos choix constructifs. Sur le plan technique, cela exige un renforcement de l'investissement dans la recherche sur les matériaux et procédés à faible impact, avec une orientation résolument tournée vers l'écoconception.

C'est dans cette dynamique de transition écologique que s'inscrit le présent travail, consacré à la formulation et à la caractérisation hygrothermique et physico-mécanique d'un béton biosourcé à base de balle de riz (BBR). Ce matériau innovant est élaboré à partir d'un résidu agricole abondant, renouvelable et peu transformé, ce qui en fait une solution potentielle pour une construction plus durable.

Les objectifs principaux de ce travail sont les suivants :

- Identifier les conditions optimales de formulation du béton à base de balle de riz ;
- Caractériser les propriétés physiques et mécaniques, telles que la densité, la résistance à la compression et à la traction ;

- Évaluer de son comportement hygrothermique, notamment en termes de conductivité thermique et de perméabilité à la vapeur d'eau.

Pour atteindre ces objectifs, une campagne expérimentale a été conduite, en faisant varier la proportion de balle de riz dans le mélange. Ce travail s'avère complexe, car la formulation dépend étroitement des caractéristiques des matériaux en présence. En effet, la nature et la granulométrie des balles de riz, leur capacité d'absorption, la qualité du sable utilisé (module de finesse, propreté), ou encore la résistance du liant, influencent fortement le comportement final du matériau. Cette variabilité impose une démarche rigoureuse, fondée sur l'expérimentation, l'analyse comparative et l'ajustement progressif des formulations.

La structure du mémoire suit une progression logique en trois étapes :

- Le premier chapitre est consacré à une revue des matériaux composites biosourcés, notamment ceux intégrant des fibres végétales, des granulats issus de biomasses ou des déchets agricoles, afin d'en dégager les grandes tendances et les limites actuelles.
- Le deuxième chapitre décrit en détail les matériaux utilisés ainsi que la méthodologie expérimentale adoptée pour l'étude des bétons à base de balle de riz.
- Le troisième chapitre présente et analyse les résultats expérimentaux relatifs aux propriétés physiques, mécaniques et hygrothermiques du matériau, ainsi que les résultats des simulations et des traitements statistiques réalisés.

En s'inscrivant dans une démarche à la fois scientifique et environnementale, ce projet ambitionne de contribuer à l'innovation dans le domaine des matériaux de construction, en conciliant performance technique, durabilité environnementale et valorisation des ressources locales

CHAPITRE I. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIE

I.1. Introduction

Dans le contexte actuel de la transition écologique et de la lutte contre le changement climatique, le secteur de la construction est appelé à revoir en profondeur ses pratiques, notamment en matière de choix des matériaux. La recherche de solutions durables conduit à l'émergence de matériaux à faible empreinte carbone, plus respectueux des ressources naturelles et mieux adaptés aux enjeux environnementaux. Parmi ces alternatives innovantes, les bétons biosourcés suscitent un intérêt croissant.

Ces matériaux se caractérisent par l'intégration de granulats d'origine organique tels que les fibres végétales tels que balle de riz [2],[3], paille [4], chènevotte de chanvre [5], etc. Combinés à des liants d'origine minérale, souvent à base de ciment ou de chaux. Cette association entre composants naturels et techniques traditionnelles ouvre la voie à des bétons légers, dotés de bonnes capacités isolantes et d'une forte inertie hygrométrique, leur permettant de réguler efficacement l'humidité intérieure [6].

Outre leurs performances hygrothermiques intéressantes, ces matériaux répondent également à des enjeux plus larges : valorisation de ressources locales souvent considérées comme des déchets ou sous-produits agricoles, réduction des émissions de gaz à effet de serre, et ancrage dans une logique d'économie circulaire territoriale. L'utilisation de fibres renouvelables permet aussi de réduire la dépendance aux matériaux conventionnels à forte intensité énergétique comme le ciment ou les granulats non renouvelables.

Ce chapitre propose une exploration approfondie des propriétés physico-mécaniques et environnementales de ces bétons biosourcés, à la lumière des recherches scientifiques actuelles. Il s'agira notamment d'analyser leurs atouts fonctionnels, de pointer les limites encore existantes (liées à la variabilité des matières premières, la durabilité, ou encore la standardisation), et d'esquisser des perspectives d'évolution pour favoriser leur intégration à grande échelle dans les pratiques constructives.

I.2. Présentation générale

Les bétons biosourcés désignent une nouvelle génération de matériaux de construction intégrant un liant minéral, tel que le ciment ou la chaux, à des granulats d'origine biologique, issus de la biomasse végétale ou animale. Contrairement aux formulations classiques à base de ciment, sable et gravier, ces bétons intègrent des éléments naturels comme la chènevotte de chanvre, la balle de riz, la paille, le miscanthus, ou encore des fibres animales.

Ce type de composition présente un double intérêt à savoir :

- ❖ il contribue à réduire l'impact environnemental de la construction en remplaçant les matières premières non renouvelables par des coproduits agricoles ou déchets organiques, généralement peu valorisés [7].
- ❖ il permet d'atteindre des performances intéressantes en termes de confort intérieur, notamment grâce à ses capacités d'isolation thermique, de régulation hygrométrique (grâce à la microporosité des fibres naturelles) et à sa légèreté, qui peut alléger les structures et faciliter la mise en œuvre [8].

Ces matériaux s'intègrent parfaitement dans une démarche de construction durable, en combinant performance énergétique, diminution de l'empreinte carbone et utilisation de matières premières locales souvent peu exploitées [9]. En réutilisant des résidus agricoles au sein de la filière du bâtiment, ils s'intègrent dans une démarche d'économie circulaire, tout en apportant une réponse concrète aux enjeux environnementaux contemporains.

Plusieurs chercheurs ont marqué ce domaine, notamment Ayité et al [3] qui a étudié l'emploi de la balle de riz pour les climats tropicaux, [6],[10], spécialisée dans les performances hygrothermiques des bétons de chanvre, Chabannes [11], dont les travaux portent sur la simulation numérique des transferts couplés dans les matériaux à base de fibres végétales [12].

I.3. Composition et formulation

Le béton biosourcé est une alternative durable au béton traditionnel, intégrant des matériaux d'origine biologique pour réduire son empreinte carbone. Sa formulation repose sur quatre composants principaux :

I.3.1. Granulats végétaux

Ces granulats remplacent partiellement ou totalement les granulats minéraux dans la composition du béton. Ils proviennent de diverses sources végétales telles que la paille, le bois haché, les coques de noix de coco, les balles de riz, le chanvre, le lin, le miscanthus, le colza. Ces matériaux confèrent au béton biosourcé des propriétés intéressantes, notamment une légèreté accrue et de bonnes performances en isolation thermique et acoustique.

I.3.2. Liant minéral

Le rôle du liant minéral est d'assurer la cohésion du mélange. Traditionnellement, le ciment est utilisé, mais dans le cas des bétons biosourcés, des liants alternatifs tels que la chaux ou la terre peuvent être employés. Ces liants offrent des avantages environnementaux en réduisant les émissions de CO₂ associées à la production de ciment.

I.3.3. Eau

L'eau est essentielle pour l'hydratation du liant minéral, permettant ainsi la prise et le durcissement du béton. Elle joue également un rôle crucial dans le contrôle de la consistance du mélange et dans le développement des propriétés mécaniques du matériau.

Le béton biosourcé représente une avancée significative vers une construction plus durable. Le **Tableau I. 1** montre les différents travaux. En intégrant des matériaux d'origine végétale et en utilisant des liants alternatifs, il est possible de réduire l'empreinte carbone des constructions tout en maintenant des performances techniques satisfaisantes. L'ajout d'adjuvants tels que les métakaolin et les cendres volantes permet d'optimiser les propriétés du béton biosourcé, offrant ainsi une alternative viable et respectueuse de l'environnement aux bétons traditionnels.

Tableau I. 1 : formulations de bétons biosourcés et de leurs résultats obtenus

Chercheurs / Projet	Granulat végétal utilisé	Liant principal	Rapport eau/liant	Masse volumique (kg/m ³)	σ_c (MPa)	μ (-)
Chabannes [13]	Chènevotte de chanvre	Chaux aérienne / NHL	0,5 – 0,8	400 – 600	0.4 – 0.7	4 – 6
Collet [10]	Chènevotte	Chaux NHL 2 / NHL 3,5	0,6 – 0,9	350 – 600	0.3 – 0.5	3 – 5
Chabi [14]	Sciure + paille + tiges de mil/sorgho	Chaux + ciment / terre stabilisée	0,5 – 0,7	300 – 650	0.2 – 0.5	2 – 4
Elfordy [15]	Chanvre	Plâtre + chaux	0,7 – 0,9	450 – 650	0.5 – 0.8	5 – 7
Laborel- Préneron [16]	Paille de blé / lin / autres fibres agricoles	Terre crue + ciments alternatifs	0,6 – 0,8	600 – 1000	0.3 – 0.6	~5
Nozahic [12]	Chanvre	Chaux hydraulique naturelle	~0,7	500 – 650	0.8 – 1.5	7 – 10
Projet BioBuild (UE)[17]	Fibres de bois, paille, chanvre	Liants géopolymères + additifs biosourcés	Variable	300 – 800	0.4 – 0.6	4 – 5
Soudani [18]	Tige de tournesol	Ciment + chaux	0,5 – 0,7	500 – 750	0.6 – 1.0	5 – 6

Les performances des bétons biosourcés dépendent de manière étroite des caractéristiques de leurs constituants, tant en termes de nature que de proportions. En particulier, la composition du liant, le type de granulat végétal utilisé, ainsi que le rapport eau/liant influencent fortement les propriétés mécaniques et thermiques du matériau final [15],[19]

Le choix du liant joue un rôle crucial dans le développement des propriétés mécaniques. Les liants à base de chaux aérienne, de chaux hydraulique naturelle ou de mélanges formulés sont les plus couramment employés. Leur nature conditionne la cinétique de prise, la porosité finale et la résistance à la compression du béton biosourcé. Par exemple, un liant trop hydraulique tend à former une matrice plus rigide mais moins compatible avec les mouvements hygroscopiques des fibres végétales, ce qui peut nuire à la durabilité du matériau [20]. À l'inverse, des liants trop souples peuvent améliorer la souplesse du composite mais limiter sa résistance mécanique.

Le rapport eau/liant est également déterminant. Un excès d'eau dans le mélange augmente la porosité résiduelle une fois le liant pris, ce qui peut réduire la résistance mécanique tout en améliorant la capacité d'isolation thermique. À l'inverse, un mélange trop sec peut nuire à l'homogénéité et à la cohésion du matériau, entraînant une diminution de ses performances globales. La conductivité thermique est, elle aussi, sensible à la formulation. Une densité plus faible, généralement obtenue par un enrobage léger des granulats avec un liant dilué, favorise la réduction de la conductivité thermique, ce qui améliore les performances isolantes du matériau. Toutefois, cela se fait souvent au détriment de la résistance mécanique. Il existe donc un compromis à trouver entre performances thermiques et performances mécaniques, en fonction de l'usage visé (mur porteur, cloison, remplissage, etc.) [21].

Ainsi, une maîtrise fine de la formulation incluant le type de liant, le dosage en eau, la densité de compactage et le type de granulats est essentielle pour adapter les propriétés du béton biosourcé à son application. De nombreuses études expérimentales s'attachent actuellement à identifier les formulations optimales selon les contraintes spécifiques des projets de construction durable.

I.4. Propriétés mécaniques et masse volumique

Les bétons biosourcés, composés de liants minéraux (comme la chaux ou le ciment) et de granulats végétaux (chanvre, lin, balle de riz, etc.), se caractérisent par une faible masse volumique, généralement comprise entre 300 et 900 kg/m³, et une résistance en compression modeste, souvent inférieure à 2 MPa. Cette faible densité résulte de la porosité intrinsèque des fibres végétales et de l'architecture aérée du matériau, ce qui limite leur usage à des applications non structurelles telles que le remplissage de murs ou les cloisons isolantes. Le taux de liant et la granulométrie des fibres influencent fortement les performances mécaniques : un liant bien dosé améliore l'adhérence fibre-matrice, tandis que des fibres fines augmentent la compacité et donc la résistance. Cependant, un excès de liant peut altérer la perméabilité et provoquer des fissurations.

La résistance mécanique de ces bétons est étroitement liée à leur masse volumique : plus la densité est faible, plus la porosité augmente, ce qui réduit la capacité portante du matériau. Par exemple, un béton de chanvre avec une densité de 450 kg/m³ affiche une résistance inférieure à 0,5 MPa, contre 1,5 MPa pour une densité de 750 kg/m³. Cette relation inverse entre densité et résistance nécessite une optimisation précise de la formulation pour concilier légèreté,

isolation thermique et stabilité minimale. Malgré leur faible performance mécanique, ces matériaux se distinguent par leur faible impact environnemental et leur excellente régulation hygrothermique, ce qui les rend adaptés aux constructions écologiques [3],[13],[19].

I.5. Comportement thermique

Les bétons biosourcés présentent une très faible conductivité thermique (entre 0,03 et 0,544 W/m. K), ce qui les rend particulièrement performants en tant qu'isolants naturels. Ils contribuent à maintenir une température intérieure stable tout en réduisant les besoins en chauffage ou en climatisation. Le **Tableau I. 2** **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** présente une modélisation du comportement thermique de formulations à base de balle de riz, en tenant compte des spécificités climatiques de l'Afrique de l'Ouest[3]

Tableau I. 2 : Caractéristiques des mélanges balles de riz – sable étudiés

% sable par rapport aux balles de riz	Module de finesse	Densité apparente à l'état sec	Densité absolue à l'état sec
20%	3.40	0.35	1.05
40%	3.10	0.51	1.30
60%	2.93	0.63	1.44
80%	2.78	0.73	1.60
100%	2.68	0.80	1.70

Les études de Collet [22] ont révélé que l'humidité joue un rôle déterminant dans les performances thermiques des matériaux à base de chanvre (**Tableau I. 3** et **Tableau I. 4** **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). En effet, lorsque l'humidité augmente, la conductivité thermique augmente également, ce qui réduit le pouvoir isolant du matériau [10]. Ce phénomène s'explique par le remplacement de l'air emprisonné dans les pores par de l'eau, un fluide plus conducteur de chaleur. Par ailleurs, les travaux de Laborel-Préneron [16] ont mis en évidence l'effet de la densité sur cette même propriété thermique : plus le matériau est compact, plus sa conductivité augmente. Cela est lié à la diminution de la porosité, qui limite la présence d'air, naturellement isolant. Ainsi, la maîtrise de l'humidité et de la compacité apparaît essentielle pour garantir de bonnes performances thermiques dans les bétons biosourcés [23].

Tableau I. 3 : L'influence de la masse volumique sur les propriétés thermique [3]

	Masse volumique (g/cm ³)	Taux d'humidité (%)	Porosité (%)	Conductivité thermique (W/mK)
Eprouvette 4	0,708	7,63	28,88	0,377
Eprouvette 5	0,815	8,31	28,65	0,544
Eprouvette 6	0,768	7,91	28,48	0,422
Moyenne	0,763	7,95	28,67	0,447
Ecart type	0,07	0,46	0,27	0,11

Tableau I. 4 : Récapitulatifs des différents essais thermiques en fonction des humidités relatives

HR	Valeur	ρ_{moy} [kg.m ³]	w_{moy} [%]	Sonde fil		Sonde anneau		
				λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	R ²	a [m ² .s ⁻¹]	λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	C _{aj} [%]
0 2%	Moyenne	39,4	1,10	0,042	0,9999	2,72 E-07	0,16	4,26
	Écart type	2,2	0,35	0,001	0,0000	1,62E-08	0,01	1,40
	Coef Var (%)	5,7	31,5	1,6	0,0000	6,0	4,4	32,8
50%	Moyenne	40,7	4,63	0,046	0,9999	3,02 E-07	0,20	3,77
	Écart type	2,2	0,06	0,001	0,0000	1,66 E-08	0,01	0,88
	Coef Var (%)	5,4	1,2	1,6	0,00	5,5	3,2	23,3
80%	Moyenne	41,9	7,62	0,051	0,9999	2,96 E-07	0,21	4,35
	Écart type	2,3	0,07	0,001	0,0001	2,63 E-08	0,01	1,70
	Coef Var (%)	5,4	0,9	2,5	0,0	8,9	5,2	39,1

I.6. Régulation hygrométrique

Les matériaux biosourcés tels que le béton de chanvre se distinguent par leurs propriétés hygrothermiques uniques, en particulier leur aptitude à interagir avec l'humidité de l'air ambiant. Cette aptitude, connue sous le nom de *Moisture Buffer Value* (MBV), désigne la capacité d'un matériau à absorber l'humidité lorsque l'air est humide, à la stocker temporairement dans sa structure poreuse, puis à la restituer lorsque l'air s'assèche. Il s'agit

d'un paramètre crucial pour assurer la stabilité de l'environnement intérieur, tant en termes de confort que de durabilité des bâtiments [21].

Des recherches expérimentales menées notamment par [10], [13] ont permis de caractériser cette propriété à l'aide d'essais normalisés, effectués en environnement contrôlé, selon le protocole défini par le Nordtest Project [17]. Leurs travaux ont révélé que le béton de chanvre, grâce à sa structure hautement poreuse et à la nature hygroscopique des fibres végétales, présente des valeurs de *Moisture Buffer Value* élevées, souvent supérieures à $2 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \% \text{HR})$, ce qui le classe dans la catégorie des matériaux ayant une forte capacité de régulation de l'humidité.

Comparativement, les matériaux conventionnels comme les plaques de plâtre, les briques cuites ou les bétons ordinaires affichent des *Moisture Buffer Value* nettement plus faibles (généralement inférieures à $1 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \% \text{HR})$), ce qui limite leur capacité à réguler les excès ou déficits d'humidité à l'intérieur. Cette différence de performance rend les matériaux biosourcés particulièrement pertinents pour les constructions bioclimatiques ou passives, notamment dans les régions humides ou sujettes à de fortes variations saisonnières d'hygrométrie [24].

La capacité tampon hygrométrique contribue à plusieurs avantages fonctionnels au sein du bâtiment :

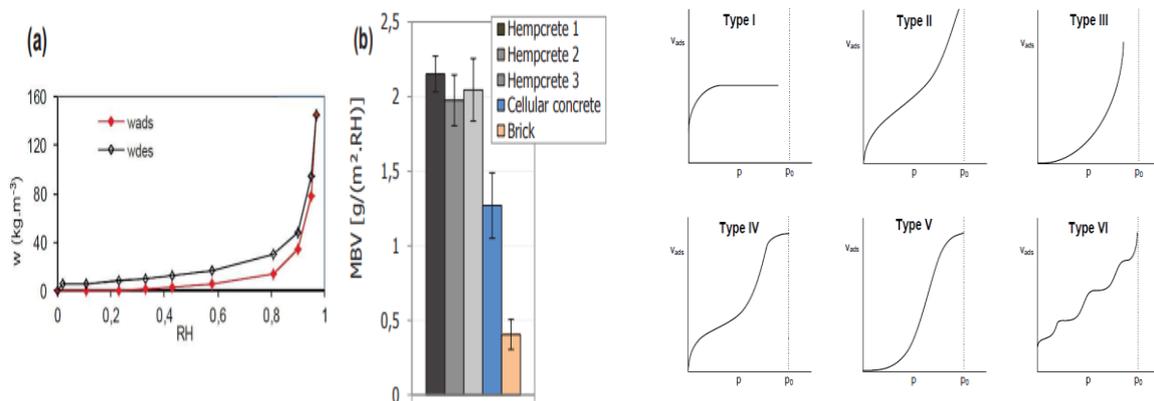
- Stabilité de l'humidité relative à l'intérieur, réduisant les pics d'humidité susceptibles de favoriser la condensation et la croissance de moisissures ;
- Amélioration du confort thermique perçu, en limitant les effets de surchauffe ou de refroidissement rapide dus aux échanges thermiques associés à l'humidité ;
- Réduction des besoins énergétiques liés à la ventilation et à la déshumidification mécanique.

Ces mécanismes reposent sur la microstructure des matériaux biosourcés, notamment sur leur porosité multi-échelle, qui facilite les échanges de vapeur d'eau entre l'air intérieur et la matrice solide (**Figure 1**). De plus, la nature cellulosique des fibres végétales leur confère une grande affinité avec la vapeur d'eau, favorisant l'adsorption capillaire [19].

L'exploitation de cette propriété dans le cadre de systèmes constructifs intégrés permet donc d'améliorer la performance énergétique globale des bâtiments, tout en réduisant leur empreinte

environnementale. L'utilisation de matériaux comme le béton de chanvre ou ceux à base de balle de riz pourrait ainsi répondre efficacement aux exigences des bâtiments à faible consommation énergétique et à haute qualité environnementale.

Figure 1 : Isothermes de sorption/désorption d'un échantillon de béton de chanvre (b) valeurs de MBV des bétons de chanvres du béton cellulaires et de la brique [10]



I.7. Durabilité et sensibilité aux conditions extérieures

Les bétons biosourcés sont de plus en plus considérés comme des matériaux d'avenir pour une construction durable, notamment grâce à leur faible empreinte carbone, leur capacité à stocker du CO_2 biogénique, et leurs excellentes performances hygrothermiques. En raison de leur composition majoritairement organique et de leur forte porosité, ils présentent une capacité intéressante à réguler l'humidité ambiante et à améliorer le confort thermique dans les bâtiments [20]. Ces propriétés leur confèrent un rôle actif dans l'efficacité énergétique des constructions, notamment en climat tempéré.

Cependant, la durabilité des bétons biosourcés reste une problématique centrale qui conditionne leur acceptabilité à grande échelle. Leur longévité dépend en grande partie des conditions environnementales (exposition à l'humidité, aux cycles gel/dégel, etc.) et de la qualité de leur mise en œuvre sur chantier [21]. En effet, ces matériaux sont sensibles aux variations hygrothermiques : en cas d'excès d'humidité non évacuée, on observe des phénomènes de condensation interne, de prolifération microbienne ou encore de dégradation biologique des fibres végétales [25].

L'un des facteurs critiques affectant la durabilité est la compatibilité des revêtements utilisés. L'emploi d'enduits imperméables, souvent issus des matériaux conventionnels, peut empêcher la migration naturelle de la vapeur d'eau à travers la paroi, créant ainsi un effet de barrière qui favorise l'accumulation d'humidité dans la structure. Cela peut provoquer à moyen terme des pathologies comme le développement de moisissures ou la perte d'adhérence des couches superficielles [26].

Pour prévenir ces désordres, les bonnes pratiques de mise en œuvre recommandent l'utilisation d'enduits à forte perméabilité à la vapeur d'eau, comme les enduits à la chaux aérienne ou certains enduits terre, qui permettent de maintenir une dynamique de transfert hygroscopique compatible avec les caractéristiques du béton biosourcé [19]. Il est également crucial d'assurer une protection efficace contre les eaux de ruissellement, notamment en pied de mur et sur les parties exposées, tout en conservant une ventilation adaptée à l'intérieur du bâtiment.

La durabilité des bétons biosourcés ne pourra être garantie que par une approche globale incluant :

- Une bonne connaissance des propriétés hygrothermiques du matériau ;
- La sélection de composants compatibles ;
- Une conception adaptée à l'environnement climatique local, et une exécution conforme aux recommandations techniques spécifiques à ces matériaux.

I.8. Impact environnemental et potentiel de valorisation locale

L'un des grands avantages de ces matériaux est leur empreinte écologique réduite. L'analyse du cycle de vie (ACV) appliquée au béton de chanvre menées par l'ADEME met en évidence ses bénéfices environnementaux notables comparés aux matériaux traditionnels du bâtiment. Cette démarche englobe toutes les étapes, depuis la culture du chanvre jusqu'à la déconstruction du bâtiment, en incluant la fabrication et l'utilisation du matériau [27]. Le béton de chanvre se distingue par sa capacité notable à piéger le dioxyde de carbone. Durant sa phase de croissance, la plante de chanvre capte d'importantes quantités de CO₂ grâce au processus de photosynthèse. On estime qu'un hectare de chanvre peut fixer jusqu'à 15 tonnes de CO₂ en à peine quatre mois, ce qui représente une contribution majeure à la diminution de l'empreinte carbone du matériau. Le béton de chanvre se distingue par son faible impact environnemental, notamment grâce à sa capacité à capter le dioxyde de carbone. Après sa mise en œuvre, la chaux utilisée comme liant

continue à absorber du CO₂ atmosphérique par le processus de carbonatation, qui peut se prolonger sur plusieurs décennies, contribuant ainsi à renforcer les propriétés mécaniques du matériau au fil du temps [10]. En comparaison, le béton traditionnel, dont le ciment Portland est un composant majeur, est responsable à lui seul d'environ 8 % des émissions mondiales de CO₂. À l'opposé, le béton de chanvre agit comme un puits de carbone : il peut stocker jusqu'à 165 kg de CO₂ par mètre cube sur l'ensemble de son cycle de vie, contre environ 400 kg de CO₂ émis pour un mètre cube de béton conventionnel [10].

I.9. Conclusion partielle

L'étude bibliographique a permis de souligner les atouts des matériaux biosourcés dans le contexte de la construction durable. Leur composition à base de ressources végétales renouvelables et peu transformées leur confère des avantages notables : faible densité, bonne isolation thermique, et aptitude à réguler l'humidité intérieure [21], [13].

Bien que leurs performances mécaniques restent modestes en comparaison des matériaux conventionnels, elles peuvent convenir pour des usages spécifiques comme le remplissage de parois ou les cloisons légères [19]. Par ailleurs, leur faible conductivité thermique et leur capacité à tamponner l'humidité ambiante améliorent à la fois le confort hygrothermique et la performance énergétique du bâtiment [13].

La durabilité de ces matériaux dépend fortement de leur exposition à l'humidité et de la qualité de leur mise en œuvre. Une protection adaptée (enduits perspirants, détails constructifs soignés) est essentielle pour prévenir les désordres [21].

Enfin, ces matériaux offrent une alternative intéressante d'un point de vue environnemental : ils valorisent des résidus locaux, limitent les émissions de CO₂ liées à leur fabrication, et contribuent à la mise en place de filières constructives plus responsables [20], [24].

CHAPITRE II. MATÉRIAUX ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

II.1. Introduction

Dans ce chapitre nous mettrons en avant les matériaux, les matériels et les méthodes utilisés dans notre étude qui porte sur la formulation et caractérisation hygrothermique et physico-mécanique d'un béton biosourcé à base de balle de riz. Il démontre l'approche de la recherche en explorant étape par étape la procédure du travail depuis le choix de des échantillons jusqu'au test en passant par la préparation des échantillons.

II.2. Matériaux de base et leurs caractéristiques

Les matériaux qui nous serviront dans notre travail sont : le sable rivière, le ciment portland CEM II 42.5, la balle de riz notons que tous ces éléments sont des matériaux produits ici au Burkina Faso

II.2.1. Balle de riz

La balle de riz, enveloppe externe du grain, est un sous-produit agricole souvent négligé. De couleur brunâtre et à la texture rugueuse et poreuse, elle assure une protection naturelle contre les agressions extérieures, notamment les insectes. Bien que fragile au toucher, sa structure résistante préserve efficacement l'intégrité du grain jusqu'à sa transformation. Une image de balle riz est représenté à la Figure 2.

Les balles de riz utilisées dans cette étude proviennent de la riziculture locale de Bobo-Dioulasso, située à l'ouest du Burkina Faso, à environ 353 km de Ouagadougou. Ce sous-produit agricole, généralement considéré comme un déchet, présente pourtant un potentiel intéressant dans divers domaines, notamment la construction. Pour évaluer ses aptitudes, plusieurs analyses ont été menées : la densité apparente a été mesurée afin de déterminer sa masse volumique, un critère essentiel pour estimer sa performance comme matériau de construction. L'absorption d'eau a également été étudiée, en raison de son impact sur la durabilité en milieu humide. Enfin, une analyse granulométrique a permis de caractériser la distribution des tailles de particules, fournissant des indications sur le module de finesse et le comportement physique du matériau. Ces résultats permettront de valoriser efficacement ce résidu agricole local, tout en proposant des solutions durables adaptées au contexte burkinabé.



Figure 2 : balle de riz

II.2.2. Sable

Le sable utilisé tout au long de notre étude est un sable naturel extrait d'une carrière fluviale située dans la ville de Manga, à environ 70 kilomètres au sud-est de Ouagadougou, au Burkina Faso. Il s'agit d'un sable de rivière, largement utilisé dans la région pour les travaux de construction en raison de sa disponibilité, de sa texture relativement fine et de sa composition généralement stable présenté à la **Figure 3**. Afin de garantir la qualité et la pertinence de ce matériau dans le cadre de notre étude, plusieurs essais ont été réalisés en laboratoire. Parmi ces analyses, l'étude granulométrique occupe une place importante. Elle permet de déterminer la distribution des tailles de grains composant le sable, et ainsi d'évaluer sa capacité à assurer une bonne compacité et une répartition homogène dans un mélange, que ce soit pour la fabrication de mortiers ou de bétons. Le module de finesse a également été calculé. Ce paramètre permet d'apprécier la finesse moyenne du sable et de vérifier s'il se situe dans les limites recommandées pour un usage en construction. Un module de finesse bien ajusté contribue à une meilleure cohésion du mélange et optimise la consommation de liant. En complément, des tests de densité ont été effectués pour mesurer la masse volumique réelle et apparente du sable.



Figure 3 : sable de rivière

II.2.3. Ciment

Le ciment est un matériau de base indispensable dans tout projet de construction. Il s'agit d'un liant hydraulique, c'est-à-dire qu'il possède la capacité de faire prise et de durcir au contact de l'eau, puis de conserver sa résistance même en milieu humide. Grâce à cette propriété, il joue un rôle essentiel dans l'agglomération des constituants des mortiers et bétons, assurant ainsi la cohésion, la résistance mécanique et la durabilité des ouvrages réalisés. La **Figure 4** montre l'aspect visuelle du ciment qui se présente sous forme d'une poudre très fine, généralement de couleur grise, ce qui témoigne de la finesse de broyage des matières premières utilisées dans sa fabrication, telles que le calcaire et l'argile et bien d'autre éléments.



Figure 4 : Ciment

II.3. Méthode expérimentale

La méthode adoptée dans ce projet a été soigneusement élaborée en fonction des objectifs spécifiques fixés, à savoir la formulation et l'analyse approfondie des propriétés hygrothermiques ainsi que des caractéristiques physico-mécaniques d'un béton biosourcé intégrant de la balle de riz. Avant d'entamer la phase expérimentale, une étape préliminaire de caractérisation rigoureuse des matériaux a été conduite. Cette phase cruciale avait pour but de déterminer avec précision les propriétés physiques, et mécaniques des différents constituants utilisés dans la formulation. Grâce à cette analyse détaillée, nous avons pu recueillir des données indispensables qui ont orienté les choix techniques et méthodologiques. Cela a permis d'assurer que la composition finale du béton biosourcé réponde aux exigences spécifiques du projet, en termes de performance, de durabilité et d'adaptabilité aux conditions locales. Ainsi, la méthodologie mise en œuvre repose sur une approche structurée et progressive, combinant des formulations expérimentales et des tests de laboratoire approfondis, afin de garantir la pertinence et la fiabilité des résultats obtenus.

Un protocole méthodologique a été mis en place afin d'atteindre les objectifs fixés dans le cadre de ce mémoire.

- Identifier des essais à faire : elle a été réalisée à partir des objectifs visés ;
- Estimation des quantités de matières premières à prélever : des essais identifiés ci-dessus, le nombre de briques à fabriquer a été mis en évidence, connaissant les dimensions d'un échantillon de béton, Les quantités totales de sable, de ciment, balle de riz, d'eau ont été déterminées. Nous indiquons ainsi à titre d'information qu'au total, environ 60 échantillons de béton par formulation ;
- Formulation des différents échantillons de béton : Deux paramètres essentiels nous ont servi de base pour la formulation des échantillons de béton. Il s'agit de la teneur en eau optimale, la masse volumique de chaque matériau. Connaissant ces valeurs, on peut estimer les quantités de matières premières à disposer pour chaque formule. D'amples explications sur la formulation sont données dans les paragraphes suivants ;
- Confection proprement dite des briques : Toute théorie devant s'en suivre de pratique ;

Les échantillons de béton nécessaires pour couvrir toute cette étude ont été confectionnés en plusieurs jours.

- Maturation et séchage : les bétons préparés sont d'abord placés en immersion dans un liquide maintenu à 20°C pour la durée de maturation prévue pour chaque formulation qui est de 07 à 28 jours.

Une fois cette phase terminée, ils sont ensuite transférés dans un environnement de 60°C à 105 pendant quelques jours à plusieurs semaines. Cette étape permet d'accélérer le séchage en éliminant l'eau résiduelle qui n'a pas réagi lors du processus de maturation.

- Évaluation des performances des bétons pour chaque formulation : après avoir complété l'ensemble des étapes préliminaires, les essais de caractérisation des différents bétons ont été réalisés afin de déterminer leurs performances ;
- Analyse et discussion des résultats.

II.4. Caractérisation des matériaux

Dans cette section, les essais d'identification de nos différents matériaux seront établis conformément aux normes qui les traitent et les moyens d'acquisition le tableau 4

II.4.1. Analyse granulométrique par tamisage

Conformément aux normes NFP 18-560 et NFP 18-540, une série de tamis circulaire à maille carrées (annexe tamis1) a été utilisée pour déterminer la distribution granulométrique des sables et balle de riz. Pour être utilisées dans la fabrication des bétons biosourcés, ces matières premières doivent présenter une courbe granulométrique située dans une plage spécifique de 0.25mm et 2 mm définie en fonction du type de formulation et de stabilisation choisi.

II.4.2. Densités

La densité est une caractéristique essentielle des matériaux granulaire désignant leurs masses par unité de volume deux principaux types de densité sont couramment utilisés pour caractériser un matériau granulaire. Il s'agit de la densité apparente et la densité spécifique.

La densité apparente se réfère à la masse d'un matériau pour un volume donné en tenant en compte des vides entre les particules. Elle est mesurée en remplissant un récipient de volume connu avec le matériau, en veillant à assurer une répartition homogène des particules après pesée du récipient remplis et à vides la masse nette est obtenue par soustraction du poids du récipient vide et divisé par le volume du récipient. La densité spécifique quant à elle représente la masse des particules solides elles-mêmes sans inclure les espaces vides le pycnomètre est l'instrument permettant d'obtenir cette mesure, cette propriété est particulièrement importante

dans la formulation des bétons .La densité des balles de riz ou du sable, qu'elles soient à l'état naturel ou après humidification, est déterminée à l'aide d'une formule spécifique, qui permet de comparer leurs propriétés physiques dans différentes conditions d'utilisation [28]:

$$d = \frac{\rho_g}{\rho_e} \quad \text{Equation 1 [29]}$$

Où, d est la densité absolue (apparente) des balles de riz ;

ρ_g est la masse volumique des balles de riz sans aucun vide entre les grains (vide compris) en g/cm³ ;

ρ_e : est la masse volumique de l'eau qui est de 1g/

Ces essais, ainsi que les essais correspondants sont illustrés dans le **Tableau II. 1**

Tableau II. 1 : liste des différents essais avec les moyens d'acquisitions

Aspect	Propriétés testées	Essais d'acquisitions
Physique	Densité apparente	Absorption capillaire
	Porosités	
	Masse volumique	
Mécanique	Résistance de traction	Essai de traction
	Résistance compression	Essai de compression
Thermiques	Conductivité thermique	Acquisitions thermiques
	Diffusivité thermique	
	Effusivité thermique	
	Capacité thermique	
Hygrométriques	Perméabilité à la vapeur	Essai de perméabilité à la vapeur
	Capacité de sorption désorption	Sorption-désorption

II.4.3. Formulation et confection des bétons

II.4.3.1. Formulation des bétons

Nos échantillons ont été formulés sur la base des formulations conventionnelle que nous avons substitué le sable par la balle de riz de 0%, 25%, 50%, 75% et 100% nous avons opter pour 03 dosages en ciments à savoir 250 kg/m³, 300 kg/m³, 350 kg/m³ qui sont présentés dans le **Tableau II. 2, Tableau II. 3 et Tableau II. 4**

Tableau II. 2: Dosage en ciment 250 kg/m³

Dosage en ciment de 250 kg/m ³						E/C = 0.51
% de substitution	Sable de rivière (kg)	Balle de riz (kg)	C/R	G/C	% V sable	% V riz
0%	1610	-	-	6.4	100	-
25%	1208	113	2.2	5.3	91	9
50%	805	226	1.1	4.1	78	22
75%	403	339	0.7	3	54	46
100%	0	452	0.6	1.8	-	100

Tableau II. 3 : Dosage en ciment 300 kg/m³

Dosage en ciment de 300 kg/m ³						E/C = 0.51
% de substitution	Sable de rivière (kg)	Balle de riz (kg)	C/BR	G/C	% V sable	% V balle de riz
0%	1568	-	-	5.2	100	-
25%	1175	110	2.7	4.3	91	9
50%	784	220	1.4	3.3	78	22
75%	392	330	0.9	2.4	54	46
100%	0	440	0.7	1.5	-	100

Tableau II. 4 : Dosage en ciment 350 kg/m³

Dosage en ciment de 350 kg/m ³							E/C = 0.51
% de substitution	Sable de rivière (kg)	Balle de riz (kg)	C/R	G/C	% V sable	% V riz	
0%	1526	-	-	4.4	100	-	
25%	1145	107	3.3	3.6	91	9	
50%	763	214	1.6	2.8	78	22	
75%	382	321	1.1	2	54	46	
100%	0	429	0.8	1.2	-	100	

II.4.3.2. Confection des bétons

Après avoir terminé l'identification et la caractérisation de nos matériaux nous pouvons nous tourner vers la confection proprement dit des bétons. Différentes formulations ont été élaborées en fonction des objectifs des essais et des types de matières premières disponibles nous avons mis sur pied 03 grandes formulations et chaque formulation comporte 05 sous formulations en

gros nous avons fait une substitution par pas de 25% ce qui se traduit nous avons de béton allant de 0% à 100% de balle de riz lors de la réalisation de nos béton nous avons remarqué une augmentation du temps de malaxage de (5 à 7min) lorsque les proportions de balle de riz augmente car vue sa texture il n'est pas très facile de le rendre homogène rapidement avec d'autre constituant, après le malaxage on introduit le mélange dans les moules parallélépipédiques 4x4x16 cm (**Figure 5**) soigneusement nettoyé donc le mélange doit être compacter cet opération terminée, on recouvre le moule avec des plastiques pour réduire l'évaporation qui pourra entrainer une perte d'eau et on les conserve dans une enceinte ayant une température de 20°C pendant 24h puis on démoules les bétons et on les immerges dans un récipient remplis d'eau à température de laboratoire (**Figure 6**) pour continuer la cure du béton pendant les différentes périodes de maturation allant de 07jours à 28jours [30],[31].



Figure 5 : Moule + béton de balle de riz

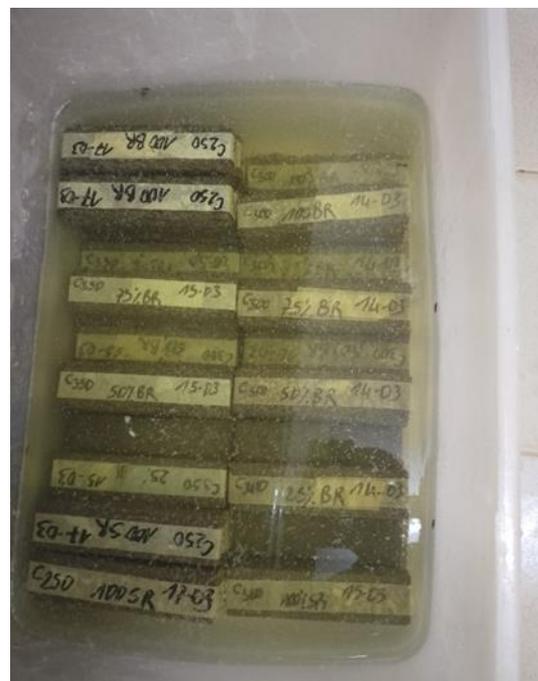


Figure 6: Echantillons immergés

II.4.4. Essais de caractérisation physique des bétons

Une fois la phase de maturation des bétons terminée, les échantillons sont démoulés, puis laissés à sécher à température ambiante pendant 24 heures. Ensuite, ils sont placés dans une étuve maintenue à 40 °C afin d'accélérer l'élimination de l'eau résiduelle contenue dans les bétons.

Cette étape est essentielle, car tous les essais en laboratoire doivent être réalisés sur des échantillons parfaitement secs. Avant de procéder à la caractérisation des bétons, une condition préalable doit être respectée : la variation de masse entre deux pesées consécutives, espacées de 24 heures, doit être inférieure ou égale à 0,1 % de la masse initiale (à l'état humide). Cette exigence garantit que le séchage est complet et que les résultats obtenus lors des essais ne seront pas influencés par l'humidité résiduelle.

II.4.4.1. Porosité accessible à l'eau et masse volumique

Il est également bien établi que la porosité a une relation étroite avec la masse volumique apparente d'un matériau.

Pour ce faire, la procédure s'appuie sur la norme NF P 18-459 [32] relative aux essais sur le béton durci concernant la porosité accessible à l'eau et la masse volumique. La méthode repose sur la saturation des réseaux poreux de l'échantillon par un fluide de référence, en occurrence de l'eau, choisie pour sa densité bien connue.

Une fois cette saturation réalisée (**Figure 7**), les échantillons sont pesés selon différentes conditions : d'abord à l'air libre, puis immergés dans l'eau. Ces deux pesées, dites (à sec) et (hydrostatique), permettent, à l'aide d'équations appropriées, de calculer les volumes des pores accessibles et, par soustraction, d'en déduire la porosité fermée. Les équations 2 et 3 permettent de déterminer la porosité et la masse volumique

$$\varepsilon = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} * 100 \quad \text{Equation 2 [32]}$$

Avec :

m_{air} : la masse de l'échantillon saturée, pesée dans l'air (kg) ;

m_{eau} : la masse de l'échantillon saturée, pesée dans l'eau (kg) ;

$m_{sèche}$: la masse de l'échantillon sec (kg).

Après la pesée hydrostatique, la masse volumique apparente est déterminée en application de l'équation 3.

$$\rho_{app} = \frac{M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} * \rho_{eau} \quad \text{Equation 3 [32]}$$

Avec :

m_{air} : la masse de l'échantillon saturée, pesée dans l'air (kg) ;

m_{eau} : la masse de l'échantillon saturée, pesée dans l'eau (kg) ;

$m_{sèche}$: la masse de l'échantillon sec (kg) ;

ρ_{eau} : la masse volumique de l'eau (kg/m^3) .



Figure 7 : Dispositif de pesé hygroscopique

II.4.4.2. Absorption capillaire

L'absorption capillaire est un test crucial pour évaluer la manière dont les bétons à base de balle de riz réagissent à l'humidité lorsqu'ils sont en contact direct avec de l'eau. Ce phénomène reproduit une situation fréquente sur le terrain, notamment les remontées d'humidité par capillarité. L'essai consiste à placer la base de l'échantillon en contact avec une lame d'eau sur une faible hauteur (entre 0,5 et 1 cm), et à mesurer la quantité d'eau absorbée au fil du temps. Le système d'essai est conçu pour garantir un niveau d'eau constant, grâce à un dispositif d'alimentation continue qui compense les pertes dues à l'absorption.

Durant l'essai, les échantillons sont pesés à intervalles réguliers (01 minutes à 24 heures) voir **Figure 8**, ce qui permet de suivre la progression de l'humidité dans le matériau. En général, la masse d'eau absorbée augmente de manière proportionnelle à la racine carrée du temps, ce qui traduit un transport capillaire classique. Un plateau peut être observé en fin d'essai si le matériau atteint rapidement son point de saturation, indiquant alors une capacité d'absorption plus faible ou une porosité moins développée. La vitesse et la quantité d'eau absorbée dépendent de plusieurs paramètres : la porosité du matériau, la connectivité des pores, la finesse du réseau capillaire et les interactions entre les particules végétales (balle de riz) et la matrice cimentaire. En tant que matériau biosourcé, la balle de riz introduit une porosité supplémentaire, favorisant

au départ l'absorption, mais pouvant aussi ralentir la diffusion de l'eau en profondeur. L'étude de ce comportement capillaire est essentielle pour juger de la résistance à l'humidité des bétons à base de matériaux naturels, notamment dans des environnements exposés aux remontées d'eau ou à une humidité persistante l'équation x montre le calcul du coefficient d'absorption capillaire.

$$C_a = \frac{M_t - M_0}{A}, \quad \leftrightarrow \quad \text{Equation 4 [33]}$$

Avec :

C_a : Coefficient d'absorption capillaire (kg/m²) ;

M_t : masse de l'échantillon à une échéance quelconque (kg) ;

M_0 : masse sèche de l'échantillon (kg) ;

A : section de l'échantillon, en contact avec l'eau (m²)

T : le temps à une échéance quelconque (s)



Figure 8 : Dispositif d'absorption capillaire

II.4.5. Essais de caractérisation mécaniques des bétons

Au cours du cycle de vie, une construction est soumise à diverses contraintes mécaniques qui peuvent compromettre sa stabilité et sa durabilité. Dans le cas du béton, ces contraintes concernent principalement les efforts de compression et de flexion, qui peuvent altérer son intégrité structurelle. Il est donc essentiel d'évaluer la résistance du matériau face à ces sollicitations pour garantir la fiabilité de l'ouvrage dans le temps.

II.4.5.1. Résistance à la flexion

La **Figure 9** présente la résistance à la flexion qui est l'un des paramètres mécaniques les plus cruciaux pour évaluer les performances des bétons. Lorsqu'elle est déterminée sur des échantillons complètement secs, on parle de flexion sèche, conformément à [31]. Après cette stabilisation du béton, l'essai de flexion est ensuite lancé, avec une vitesse de chargement généralement contrôlée jusqu'à l'apparition de la rupture révélant ainsi la limite du matériau. La résistance est calculée à partir de la même formule se résumant par un rapport entre la force de compression maximale enregistrée par les capteurs de la presse et la surface de l'échantillon chargée.



Figure 9 : Essais de flexion sur un échantillon avec la 3R

II.4.5.2. Résistance à la compression

La **Figure 10** qui représente la résistance à la compression est le deuxième paramètre mécanique le plus crucial après la résistance à la flexion. Elle est réalisée pour évaluer les performances des bétons lorsqu'il subit des charges qui lui compriment. Elle est déterminée sur des échantillons secs, on parle de compression à sec, conformément à la norme [30]. En précisant la taille relativement réduite des plaques de compression utilisées lors des essais, il est nécessaire d'ajuster la forme des échantillons pour garantir un rapport d'élançement proche. Compte tenu de la taille des modules de compression (4x4x4cm) il est primordial de réaliser l'essai de flexion dans un premier temps et par la suite récupérer les morceaux issus de cela nous permettant de réaliser l'essai de compression conformément à la norme [34]



Figure 10 : Essais de compression sur un échantillon avec la 3R

II.4.6. Essais de caractérisation thermiques des bétons

L'évaluation des propriétés thermiques et hygrothermiques des matériaux est une étape essentielle dans le choix et la mise en œuvre des matériaux destinés à la construction. Ces propriétés influencent directement la capacité d'un matériau à réguler la chaleur et l'humidité, deux facteurs majeurs du confort thermique des occupants et de la performance énergétique des bâtiments. En effet, un matériau bien adapté permet de réduire les besoins en chauffage et en climatisation, contribuant ainsi à une construction plus durable et écoénergétique. Trois propriétés thermiques fondamentales ont été déterminées grâce à l'appareil neotim et de ses sondes (**Figure 11**) pour caractériser le comportement des matériaux face aux transferts de chaleur il s'agit de : la conductivité thermique la diffusivité, et l'effusivité.

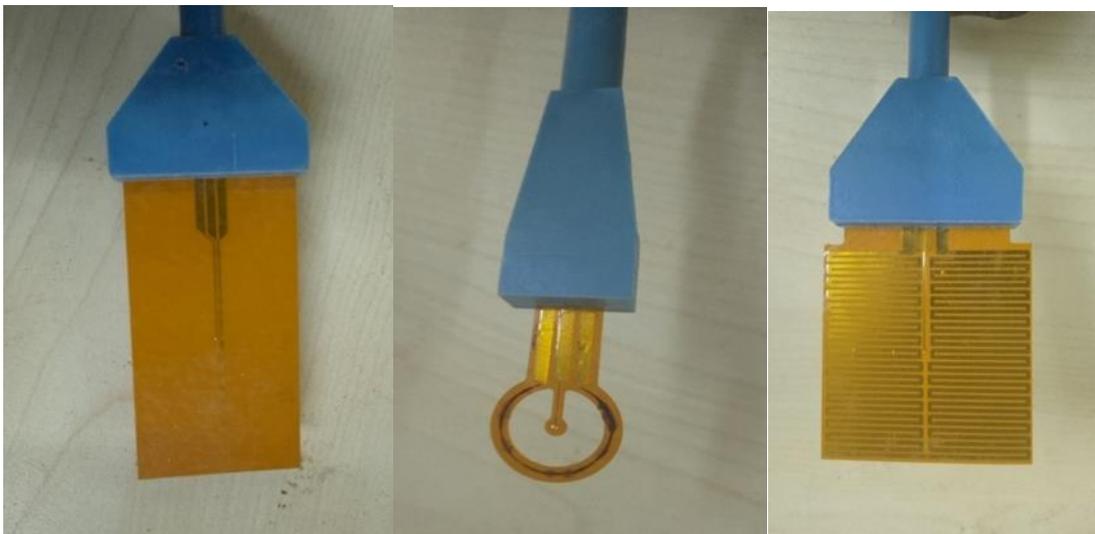


Figure 11 : Sonde à fil chaud pour mesurer des propriétés thermiques

II.4.6.1. Conductivité thermique

La conductivité thermique (λ) est la capacité que possède un matériau à transmettre la chaleur, exprimée en (W/m. C). Elle indique la quantité de chaleur pouvant traverser une unité de surface du matériau pour une différence de température donnée. Il est important de noter que cette propriété est étroitement liée à la masse volumique : les matériaux légers sont très souvent des bons matériaux isolants que les matériaux lourds qui ont tendance de mieux conduire la chaleur. Cette propriété est obtenue par mesure grâce à la sonde fil. La conductivité thermique se calcule aussi par la relation suivante :

$$\mathbf{q} = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx} \quad \text{Equation 5 [35]}$$

- q : flux de chaleur (W/m²)
- λ : conductivité thermique (W/m. K)
- $\frac{dT}{dx}$: gradient de température (K/m)

II.4.6.2. Diffusivité thermique

La diffusivité (α) est une propriété thermique fondamentale qui décrit la rapidité avec laquelle un matériau réagit à une variation de température. Autrement dit elle mesure la vitesse de propagation de la chaleur à travers le matériau lorsque celui-ci est soumis à un changement thermique. Un matériau ayant une faible diffusivité thermique signifie que ce matériau absorbe lentement et transmet lentement la chaleur que les matériaux ayant une forte diffusivité thermique elle est obtenue par mesure grâce à la sonde anneau. La diffusivité thermique se calcule aussi par la relation suivante :

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad \text{Equation 6 [35]}$$

- α : diffusivité thermique (m²/s)
- λ : conductivité thermique (W/m. K)
- ρ : masse volumique du matériau (kg/m³)
- c : capacité thermique massique (J/kg. K)

II.4.6.3. Effusivité thermique

L'effusivité thermique est une propriété qui met en avant la capacité d'un matériau à échanger de la chaleur avec son environnement notamment en surface, elle joue un rôle très importante lorsqu'on évalue le confort thermique au contact un matériau ayant forte effusivité se traduit que le matériau absorbe et restitue rapidement la chaleur par contre une effusivité faible indique une faible échange de chaleur et contribue à un très bon confort thermique .cette gradeur est déterminé grâce à la sonde à plan chaud L'effusivité thermique se calcule aussi par la relation suivante:

$$e = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c}$$

Equation 7 [35]

e : effusivité thermique ($Ws^{1/2}/m^2K$)

II.4.7. Essais de caractérisation hygrothermiques des bétons

Il est fondamental d'analyser les caractéristiques hygrothermiques d'un matériau, c'est-à-dire sa capacité à interagir avec l'humidité, qu'elle soit sous forme liquide ou vapeur. Cette évaluation permet de mieux comprendre le comportement du matériau face aux variations d'humidité dans son environnement. Pour cela, deux types d'essais ont été menés :

La perméabilité à la vapeur d'eau, qui mesure la facilité avec laquelle la vapeur traverse le matériau. Cet essai permet de déterminer si le matériau agit comme une barrière ou au contraire facilite les échanges de vapeur d'eau.

Les cycles d'absorption et de désorption, qui consistent à exposer le matériau à des conditions humides, puis à le placer en ambiance sèche, afin d'observer sa capacité à absorber puis à relâcher l'humidité. Ces tests permettent de simuler des situations réelles et d'évaluer la réactivité du matériau face aux variations climatiques.

II.4.7.1. Sorption/désorption de la vapeur d'eau

Figure 12 présente le dispositif qui traduit le phénomène d'absorption et de désorption qui traduit la capacité d'un matériau à interagir avec la vapeur d'eau présente dans l'air ambiant, cela joue un rôle très important dans le comportement hygrothermique d'un matériau plus précisément en procurant un bon confort intérieur et la bonne régulation de l'humidité et la durabilité des ouvrages.

- Absorption c'est la période pendant laquelle le matériau capte l'humidité dans l'air, cette humidité est retenue par les pores du matériau

- La désorption à l'inverse de l'absorption qui capte l'humidité dans l'air la désorption restitue l'humidité stockée lorsque l'air deviens de plus en plus sec

$$u = \frac{ms - mi}{mi}$$

Equation 8

u : absorption de la vapeur

ms : masse saturation (kg)

mi : masse initiale (kg)



Figure 12 : échantillon dans le dessiccateur pour essai de sorption

II.4.7.2. Perméabilité à la vapeur d'eau

Le dispositif est illustré dans la **Figure 13** permet de mesurer la capacité d'un matériau à laisser passer la vapeur d'eau. Cette propriété est cruciale pour éviter les phénomènes de condensation à l'intérieur des parois, ce qui peut engendrer des moisissures ou des dégradations structurelles. Un matériau présentant une bonne perméabilité à la vapeur contribue à la régulation naturelle de l'humidité intérieure.

$$\delta_p = \frac{b \cdot e}{s \cdot \Delta P_v}$$

Equation 9 [36]

- δ : perméabilité à la vapeur (kg/m·s·Pa) ;

- ΔP_v : différence de pression de vapeur d'eau (Pa) ;
- S : section de l'échantillon (m^2) ;
- e : épaisseur de l'échantillon (m) ;
- b : pente de l'évolution de la masse en fonction du temps (kg/s).

$$\mu = \frac{\delta_{air}}{\delta_p}$$

Equation 10 [36]

μ : facteur de résistance



Figure 13 : Essai de perméabilité à la vapeur

II.5. Conclusion partielle

Ce chapitre a permis de présenter de manière détaillée les matériaux de base utilisés dans le cadre de cette étude, avec une attention particulière portée à leurs caractéristiques physiques. Parmi ces matériaux, la balle de riz occupe une place centrale en tant que composant innovant et localement disponible, susceptible d'être valorisé dans le domaine de la construction durable. Les propriétés physiques telles que la granulométrie, la densité apparente et l'absorption d'eau ont été analysées, afin de mieux comprendre le comportement de ce matériau dans les formulations de béton. En complément de cette description des matériaux, le chapitre a également exposé les différentes méthodes de caractérisation mises en œuvre pour évaluer les performances des bétons à base de balle de riz. Ces méthodes couvrent un large spectre d'analyses : physiques (masse volumique, porosité), mécaniques (résistance à la compression, à la traction), et thermiques (conductivité thermique, capacité thermique). L'objectif est de disposer d'une base de données complète et rigoureuse permettant de juger de l'aptitude de ces bétons à répondre aux exigences techniques, notamment en matière de confort thermique et de

résistance structurelle. Le chapitre suivant, le chapitre 3, sera consacré à la présentation, à l'analyse et à la discussion des résultats expérimentaux obtenus à l'issue de ces essais. Il s'agira d'interpréter les données recueillies en termes de performances physico-mécaniques et hygrothermiques, afin de mieux cerner les potentialités du béton incorporant de la balle de riz dans un contexte de construction durable, en particulier dans les zones climatiques similaires à celle du Burkina Faso.

CHAPITRE III. RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

III.1. Introduction

Cette section présente de manière détaillée les résultats obtenus lors de la phase de caractérisation des matériaux employés dans la fabrication des bétons à base de balle de riz, ainsi que l'analyse approfondie des propriétés de ces bétons. Elle est organisée en trois sous-parties principales, permettant une lecture progressive et cohérente des données expérimentales et des analyses associées. Dans un premier temps, les caractéristiques fondamentales des constituants, notamment la balle de riz et le sable, sont étudiées afin de mieux appréhender leurs propriétés intrinsèques : granulométrie, composition chimique, masse volumique apparente et comportement hygroscopique. La seconde étape porte sur l'analyse des bétons intégrant la balle de riz. Les performances mécaniques (résistance à la compression et à la traction), physiques (densité, porosité) et hygrométriques (absorption d'eau, perméabilité à la vapeur) sont évaluées pour déterminer l'aptitude du matériau à un usage structurel. Enfin, une dernière phase est dédiée au traitement statistique des résultats expérimentaux et à la modélisation numérique. Des simulations hygrothermiques sont menées afin de prédire le comportement des briques dans des conditions climatiques variées, validant ainsi leur potentiel en contexte réel.

III.2. Caractéristiques de la matière première

III.2.1. Composition granulaire

Les *Erreur ! Source du renvoi introuvable.* et **Figure 15** présentent les courbes granulométriques de la balle de riz. Elles montrent une distribution continue des particules, dont les dimensions s'étendent de 0,25 mm à 4mm. Une telle répartition permet de classer la balle de riz dans la catégorie des sables grossiers, car elle présente les résultats similaires à celui du sable en raison de la taille relativement importante de ses particules cette analyse à montrer ce matériau a un module de finesse de 3,79 [29],[3].

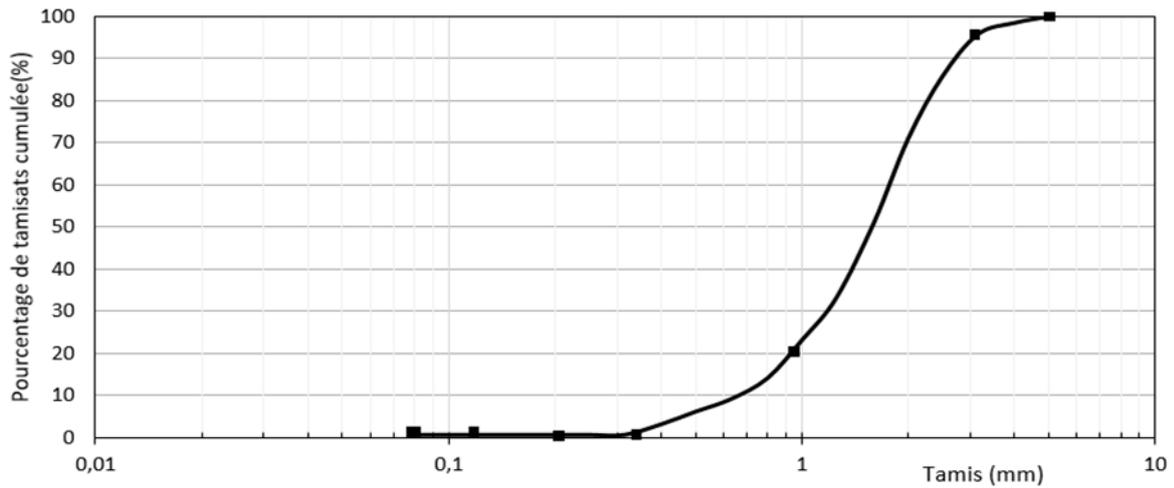


Figure 14 : Courbe granulométrique des balles de riz

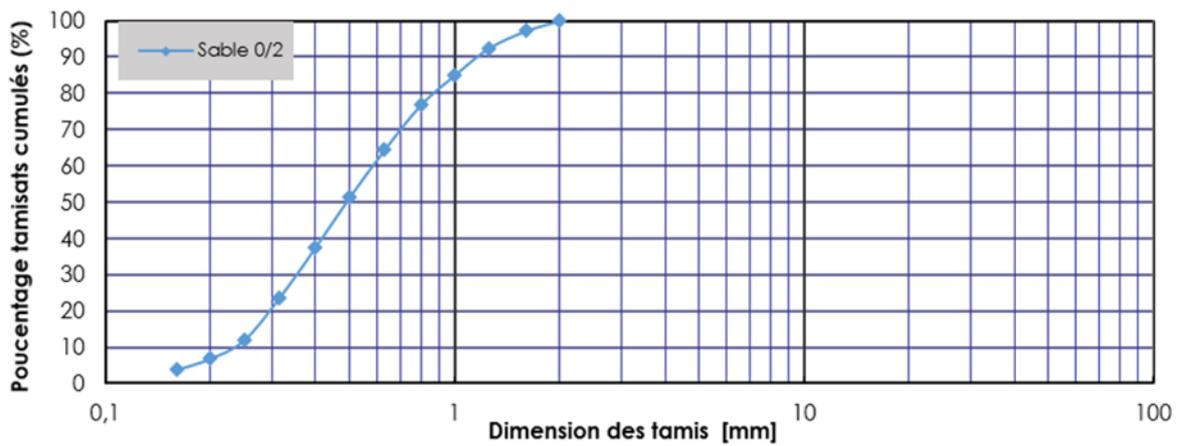


Figure 15: Courbe granulométrique du sable

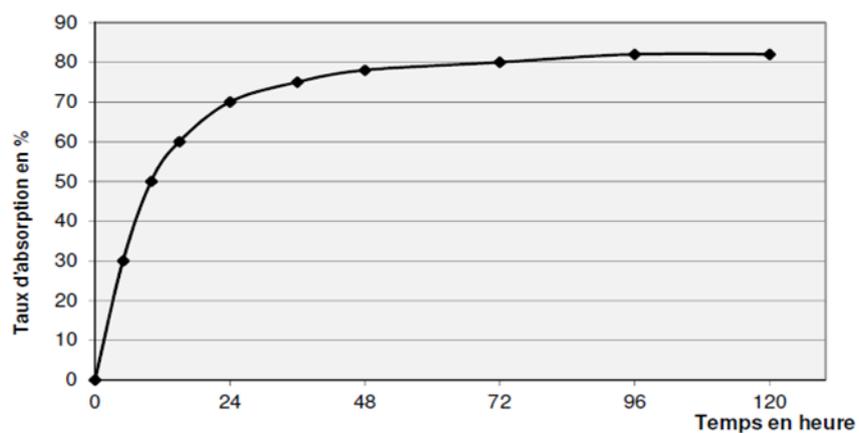


Figure 16 : courbe cinétique d'absorption d'eau des balles de riz

III.2.2. Absorption d'eau

La **Figure 16** présente le taux d'absorption de la balle de riz qui possèdent une forte propriété hygroscopique, ce qui signifie qu'elles ont une grande capacité à absorber l'eau. Cette absorption est particulièrement intense durant les premières heures suivant le contact avec l'eau, avant de ralentir progressivement jusqu'à atteindre un état d'équilibre. En moyenne, la balle de riz peut absorber jusqu'à environ 82 % de son poids en eau ce résultat nous permet de prévenir tout désordre dans son utilisation [3].

III.2.3. Densité

Les Tableau II.5 et Tableau II.6 présentent La densité des balles de riz, et du sable qu'elles soient à l'état naturel ou après humidification, est déterminée à l'aide d'une formule spécifique, qui permet de comparer leurs propriétés physiques dans différentes conditions d'utilisation [28].

Tableau II. 5 : Caractéristiques physique des balles de riz

Grandeurs caractéristiques	Unité	Grandeurs numériques
Module de finesse	-	3,79
Taux d'absorption en masse	%	82
Masse volumique apparente à l'état non mouillée	kg/m ³	750
Masse volumique absolue à l'état mouillée saturé	kg/m ³	1050

Tableau II. 6 : Caractéristiques physique du sable

Grandeurs caractéristiques	Unité	Grandeurs numériques
Module de finesse	-	2,16
Masse volumique absolue	kg/m ³	2660
Masse volumique apparente	kg/m ³	1480
Équivalent de sable au piston (%)	%	0.92

III.3. Propriétés physiques des bétons

Cette section présente les propriétés physiques des bétons à base de balle de riz, notamment la masse volumique apparente, l'absorption capillaire et la porosité ouverte. Ces paramètres sont fondamentaux pour appréhender le comportement physique de ces matériaux.

III.3.1. Masse volumique

La **Figure 16** présente l'évolution de la masse volumique apparente en fonction du taux de substitution du sable par la balle de riz dans les différentes formulations de béton. Les mélanges sans balle de riz (0 %) affichent les densités les plus élevées, comprises entre 1536,55 et 1580,65 kg/m³. À l'inverse, les formulations entièrement composées de balle de riz (100 %) présentent les plus faibles valeurs, variant de 461,05 à 540,77 kg/m³.

La substitution progressive du sable par la balle de riz, aux proportions de 0 %, 25 %, 50 %, 75 % et 100 %, entraîne une réduction progressive de la masse volumique apparente. Pour un dosage en ciment de 350 kg/m³, les valeurs observées sont respectivement de 1580, 1562,26, 1191, 658 et 517 kg/m³, ce qui correspond à une baisse globale d'environ 67 %.

Dans le cas des bétons dosés à 300 kg/m³, les masses volumiques enregistrées sont de 1537, 1386, 1038, 704 et 416 kg/m³, soit une diminution de 69 %. Enfin, pour les formulations contenant 250 kg/m³ de ciment, les densités passent de 1580 à 1415, 1012, 670 puis 444 kg/m³, représentant une réduction totale de 72 %.

Ces résultats sont cohérents avec ceux de Benmansour [37] et Elfordy[15], qui ont rapporté des masses volumiques de 400 à 900 kg/m³ pour les bétons de chanvre , ainsi que Mazhoud [38] pour les bétons à base de paille de blé (500 à 1000 kg/m³). À titre de comparaison, un béton ordinaire présente une densité de 2200 à 2500 kg/m³[39]. Ainsi, les bétons à base de balle de riz, plus légers, s'inscrivent parmi les bétons allégés, adaptés au remplissage et à l'isolation, avec un faible impact environnemental.

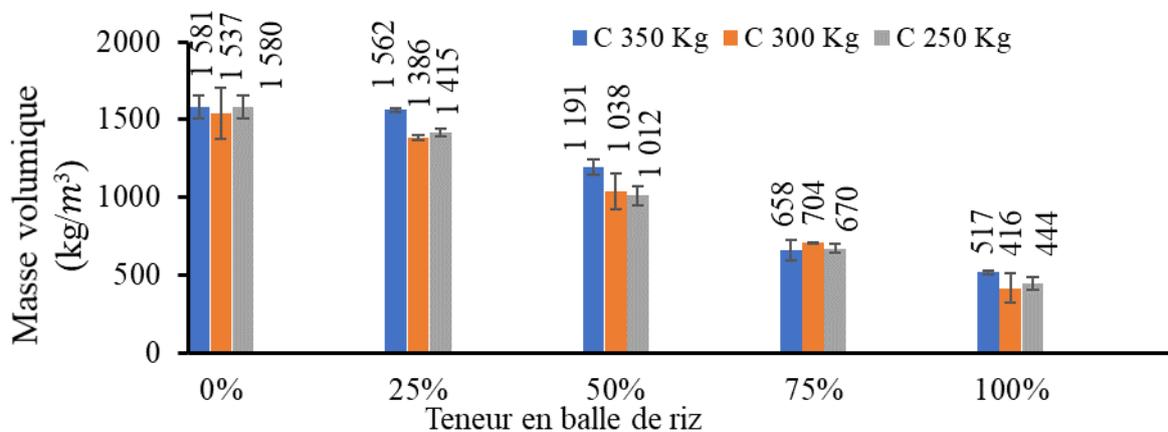


Figure 17 : Masse volumique apparente des bétons de balle de riz

III.3.2. Absorption capillaire à l'eau

Les **Figure 18**, **Figure 19** et **Figure 20** présentent les résultats expérimentaux relatifs à l'absorption capillaire des différentes formulations de bétons biosourcés à base de balle de riz, en fonction du taux de substitution du sable et de la quantité de ciment utilisée.

La formulation contenant 350 kg/m^3 de ciment (Figure 19) montre un comportement différent par rapport aux deux autres figures. Les échantillons incorporant 25 % de balle de riz présentent les valeurs d'absorption les plus faibles, traduisant une structure composite qui contient moins de vide et qui le rend moins perméable à l'eau. Cette faible absorption s'explique probablement par une meilleure cohésion de la matrice cimentaire, favorisée par la forte teneur en liant et une quantité faible de fibres (25%), ce qui limite la formation de réseaux capillaires interconnectés. En revanche, les formulations à 75 %, 50 % et 100 % de balle de riz affichent des valeurs d'absorption plus élevées, indiquant une porosité accrue et une connectivité capillaire plus développée. Cela suggère que, malgré un dosage de 350 kg/m^3 de ciment, l'augmentation de la proportion de fibres végétales perturbe la continuité de la pâte cimentaire et facilite les transferts d'eau.

Les résultats obtenus pour les formulations à 250 kg/m^3 et 300 kg/m^3 de ciment (figures 27 et 28) démontrent un mouvement contraire. Dans ces cas, les échantillons contenant 100 % et 75 % de balle de riz présentent les plus faibles taux d'absorption, en particulier aux premiers temps de mesure. Cette performance pourrait être liée à la structure plus ouverte mais moins connectée du réseau poreux, qui ralentit la migration initiale de l'eau. À l'inverse, les bétons contenant 25 % et 50 % de balle de riz, ainsi que les bétons avec 0% de balle de riz, présentent une absorption initiale plus rapide, associée à un réseau capillaire plus continu. Cependant, cette absorption tend à se stabiliser dans le temps, suggérant que, malgré une cinétique plus rapide, la capacité totale d'absorption reste modérée. Ce comportement peut être attribué à une meilleure homogénéité de la pâte avec des taux modérés d'ajout de fibres, favorisant une connectivité capillaire suffisante sans atteindre les seuils de saturation liés à la porosité excessive. Ces observations confirment que la teneur en ciment agit comme un facteur structurant dans le contrôle de la porosité capillaire, tandis que la quantité de balle de riz influence principalement la nature du réseau de pores, affectant la cinétique et la quantité d'absorption.

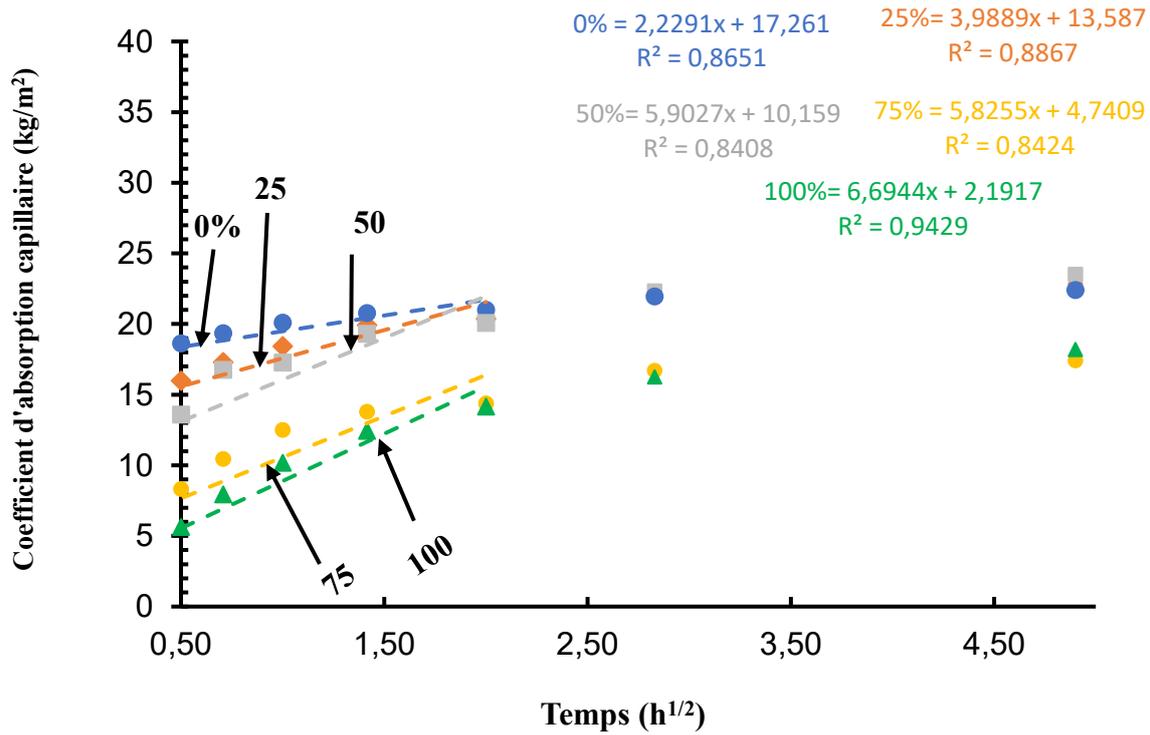


Figure 18 : coefficient d'absorption C 300 kg

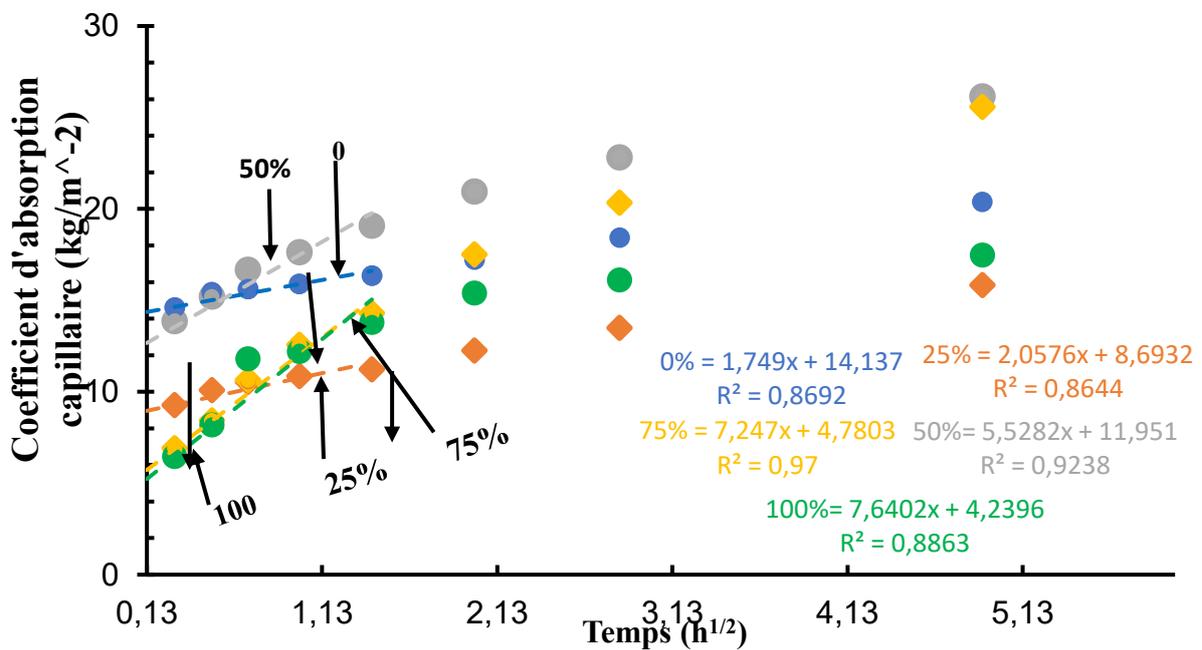


Figure 19 : coefficient d'absorption C 350 kg

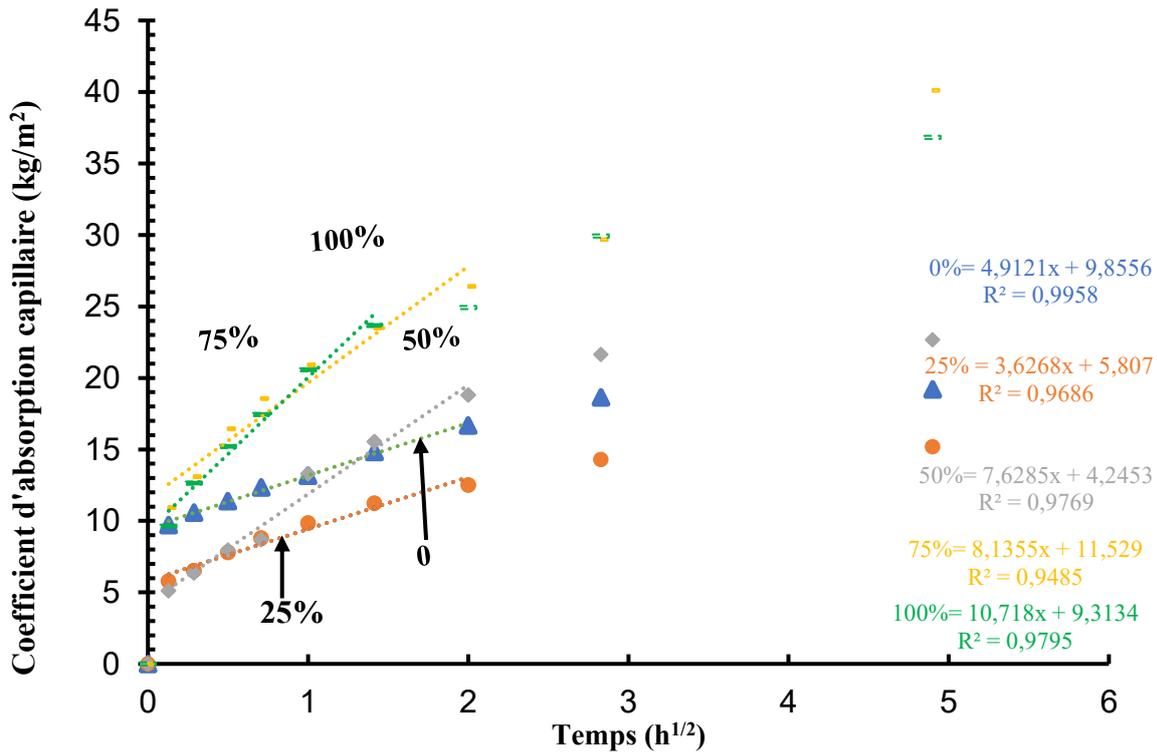


Figure 20 : coefficient d'absorption C 250kg

III.3.3. Porosité accessible à l'eau

La Figure 21 illustre l'évolution de la porosité accessible à l'eau des bétons ayant connu une substitution progressive du sable par la balle de riz, aux proportions de 0 %, 25 %, 50 %, 75 % et 100 %, entraînant une augmentation progressive de la porosité des matériaux. Pour un dosage en ciment de 350 kg/m³, les valeurs observées sont respectivement de 32,1%, 29,2, 42,1, 56,6 et 60,4%, ce qui correspond à une augmentation globale d'environ 47 % de vides.

Dans le cas des bétons dosés à 300 kg/m³, les valeurs enregistrées sont de 32,6%, 35,9%, 46,4%, 57,5% et 64,6% des vides, ces valeurs représentent une augmentation globale de 49 % des vides. Enfin, pour les formulations contenant 250 kg/m³ de ciment, les valeurs obtenues sont de l'ordres de 31%, 35,5%, 51,4%, 62,4% et 65,4% de porosité avec une augmentation totale de 53%.

Il ressort clairement que le dosage en ciment et le taux d'incorporation de balle de riz influencent de manière significative les propriétés globales des bétons étudiés. Cette tendance s'explique principalement par la faible masse volumique de la balle de riz par rapport à celle

du sable. Ainsi, l'augmentation de la proportion de balle de riz dans le mélange conduit naturellement à un allègement du béton, ce qui modifie également sa compacité et sa structure interne.

Ces observations sont en accord avec plusieurs travaux antérieurs consacrés à l'emploi d'agrégats alternatifs dans le béton, lesquels montrent des comportements analogues en matière de densité et de porosité. Les données expérimentales recueillies dans cette étude confirment cette évolution : les formulations les plus denses présentent généralement une porosité plus faible, soulignant l'impact déterminant de la microstructure sur les propriétés du matériau.

Les valeurs de porosité obtenues pour les bétons intégrant de la balle de riz varient en général entre 40 % et 70 %, selon le taux de substitution. Ces résultats sont cohérents avec ceux rapportés pour d'autres bétons biosourcés :

Les matériaux biosourcés présentent généralement une porosité élevée, influençant directement leurs propriétés mécaniques et hygrothermiques. À titre d'exemple, le béton de chanvre affiche une porosité comprise entre **60 % et 80 %** [36], tandis que les bétons à base de lin ou de paille présentent des porosités allant de **50 % à 75 %** [37], [38]. En comparaison, le béton conventionnel possède une porosité bien plus faible, généralement **inférieure à 30 %**, ce qui explique en partie ses performances supérieures en matière de résistance mécanique et de conductivité thermique [38].

En somme, l'augmentation de la porosité due à l'intégration de la balle de riz engendre une diminution de la densité apparente, ce qui affecte à la fois les propriétés mécaniques (baisse de résistance) et thermiques (meilleure capacité isolante), tout en orientant ces matériaux vers des applications non porteuses, telles que les éléments de remplissage ou d'isolation.

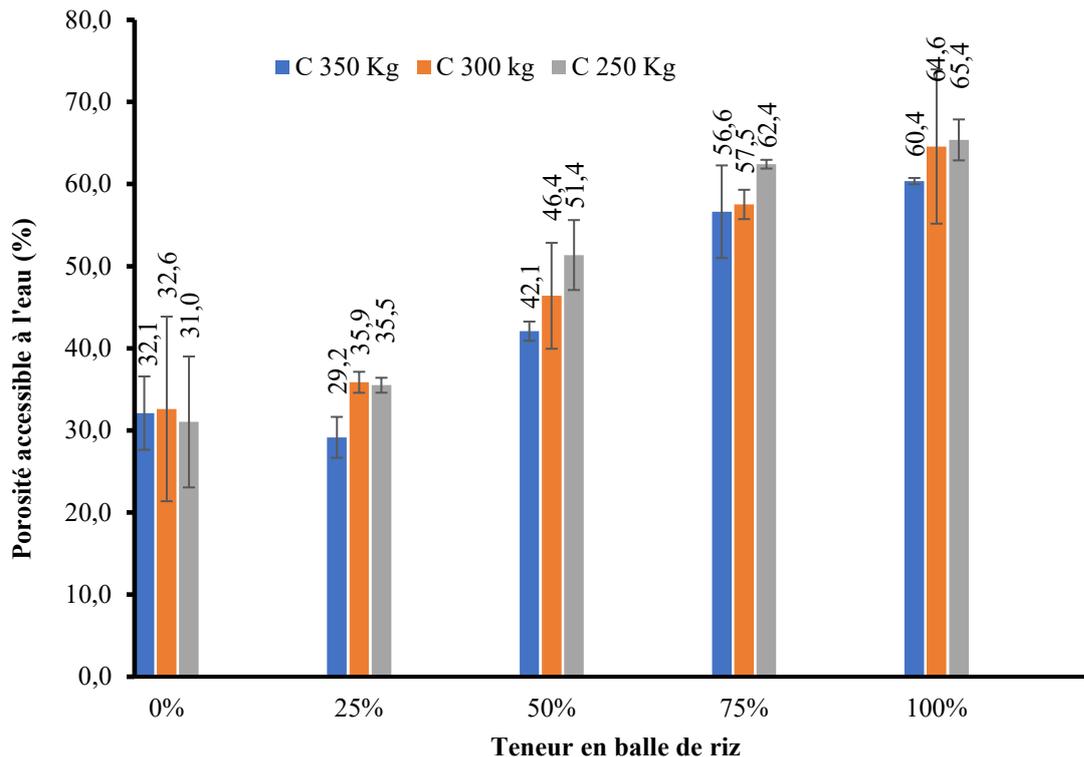


Figure 21 : porosité accessible à l'eau

III.4. Propriétés mécaniques

Tout au long de son cycle de vie, une construction est exposée à différentes sollicitations mécaniques susceptibles d'affecter sa stabilité et sa longévité. Le béton, en particulier, est confronté à des efforts de compression et de flexion qui peuvent compromettre son intégrité structurelle. Ainsi, l'évaluation de ses performances mécaniques face à ces contraintes s'avère indispensable pour assurer la durabilité et la sécurité des ouvrages dans le temps.

III.4.1. Résistance en flexion

Les Figure 22 et Figure 22 : résistance à la flexion

Figure 23 illustrent l'évolution de la résistance à la flexion des bétons en fonction du taux de substitution du sable par la balle de riz (0 %, 25 %, 50 %, 75 %, et 100 %), évaluée après 7 et 28 jours de cure, pour trois dosages en ciment : 250 kg/m³, 300 kg/m³ et 350 kg/m³.

Pour un dosage de 350 kg/m³, les résistances mesurées sont de 1,66 MPa, 1,65 MPa, 1,13 MPa, 0,56 MPa et 0,58 MPa respectivement, pour les taux de substitution croissants. Cela représente une diminution globale de 66 % par rapport au béton de référence (0 %). Les bétons 300 kg/m³

de ciment, les valeurs obtenues sont de 1,66 MPa, 1,78 MPa, 1,26 MPa, 0,54 MPa et 0,43 MPa, traduisant une réduction globale de 76 %. Pour un dosage de 250 kg/m³, les résultats sont de 1,41 MPa, 1,19 MPa, 1,09 MPa, 0,46 MPa et 0,30 MPa, soit une diminution de 78 %.

Pour un dosage de 350 kg/m³, les résistances mesurées sont de 1,86 MPa, 1,75 MPa, 0,93 MPa, 0,36 MPa et 0,35 MPa respectivement, pour les taux de substitution croissants. Cela représente une diminution globale de 81 % de la résistance globale. Les bétons 300 kg/m³ de ciment, les valeurs obtenues sont de 1,12 MPa, 1,02 MPa, 0,58 MPa, 0,31 MPa et 0,24 MPa, traduisant une réduction globale de 78 % de la résistance globale. Pour un dosage de 250 kg/m³, les résultats sont de 1,04 MPa, 0,85 MPa, 0,55 MPa, 0,29 MPa et 0,24 MPa, soit une diminution de 76 % de la résistance globale.

La diminution significative de la résistance mécanique, tant à court qu'à long terme, est principalement liée aux propriétés intrinsèques de la balle de riz. En effet, sa nature lignocellulosique entraîne une augmentation de la porosité, une mauvaise compacité et une hétérogénéité accrue de la matrice cimentaire. Ces caractéristiques nuisent à la cohésion interne du matériau et limitent le développement optimal des performances mécaniques du béton.

Des tendances similaires ont été rapportées dans la littérature concernant les performances mécaniques des bétons biosourcés. Par exemple, le béton de chanvre présente des résistances à la traction comprises entre 0,4 et 1,2 MPa, selon le type de liant utilisé et le pourcentage de fibres incorporé [15], [39]. De leur côté, les bétons intégrant de la paille de blé ou de la bagasse de canne à sucre subissent une chute de résistance mécanique pouvant dépasser 70 % lorsque le taux de substitution dépasse 50 %, avec des résistances résiduelles situées entre 0,2 et 1 MPa [37]. Enfin, certaines formulations à base de fibres de lin peuvent atteindre des valeurs plus élevées, de l'ordre de 1 à 1,8 MPa, à condition que les fibres soient correctement traitées et que la formulation soit optimisée [36].

Les performances mécaniques obtenues dans ce travail confirment le comportement typique des bétons à matrice végétale, marqués par une bonne légèreté et une capacité isolante, mais des limites en termes de résistance, les réservant essentiellement à des usages non structuraux (remplissage, cloisonnements, isolants thermiques). Ces résultats s'alignent pleinement avec les données issues de la littérature.

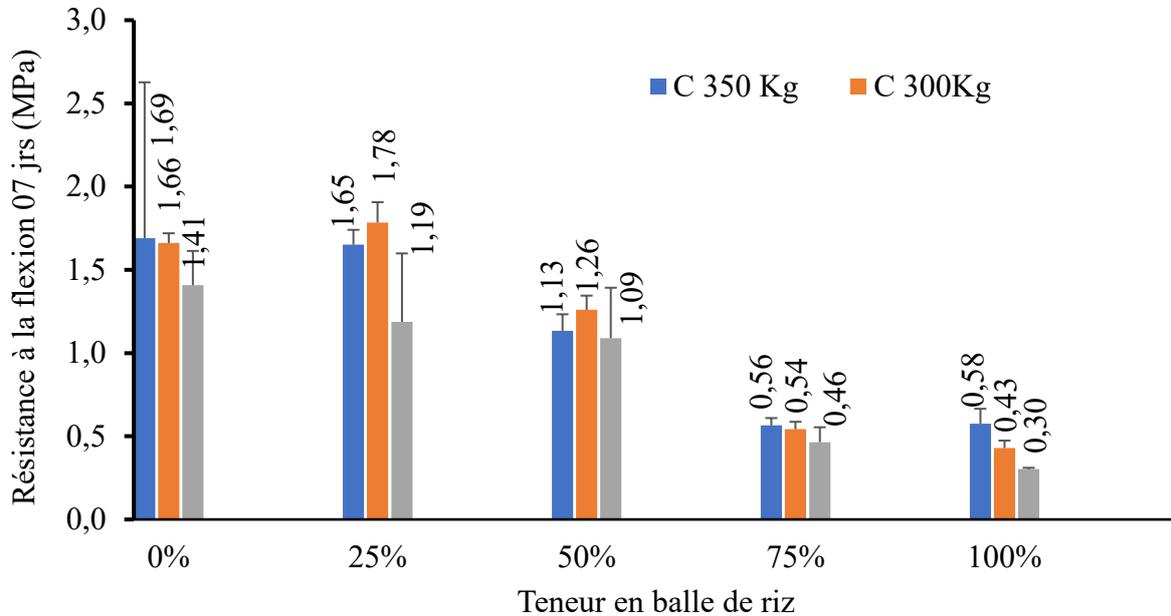


Figure 22 : résistance à la flexion

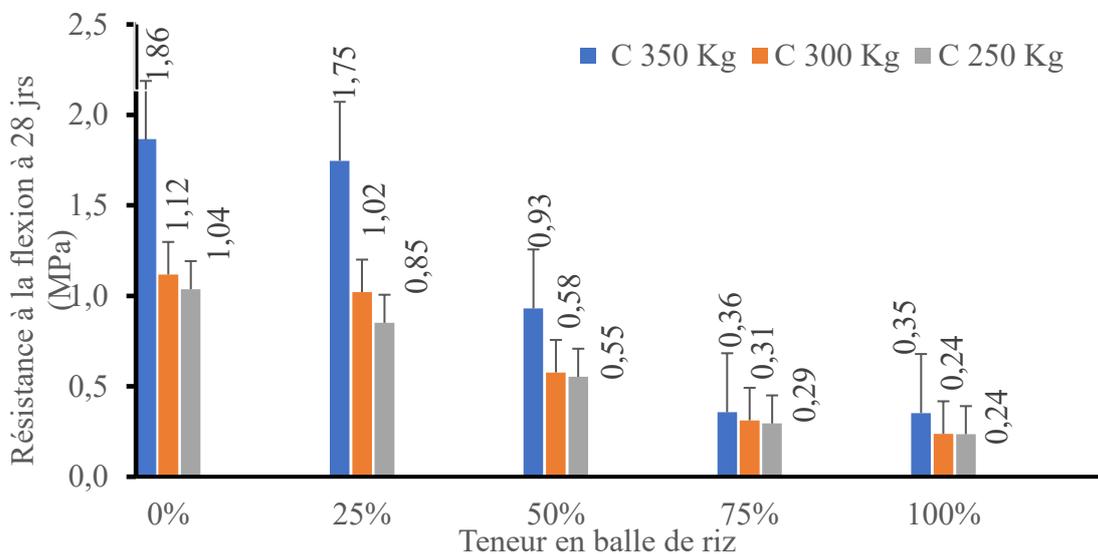


Figure 23 : résistance à la flexion

III.4.2. Résistance à la compression

Les **Figure 24** et **Figure 25** illustrent la variation de la résistance à la compression des bétons en fonction du taux de remplacement du sable par la balle de riz, avec des mesures effectuées à 7 et 28 jours de cure.

Pour un dosage de 350 kg/m³, les résistances mesurées sont de 6,01 MPa, 2,67 MPa, 0,7 MPa, 0,26 MPa et 0,25 MPa respectivement, pour les taux de substitution croissants. Cela représente une diminution globale de 96 % par rapport au béton de référence (0 %). Les bétons 300 kg/m³ de ciment, les valeurs obtenues sont de 4,91 MPa, 3,2 MPa, 1,04 MPa, 0,26 MPa et 0,19 MPa, traduisant une réduction globale de 96 %. Pour un dosage de 250 kg/m³, les résultats sont de 2,49 MPa, 1,71 MPa, 0,77 MPa, 0,26 MPa et 0,07 MPa, soit une diminution de 98 %.

Pour un dosage de 350 kg/m³, les résistances mesurées sont de 8,33 MPa, 4,12 MPa, 1,69 MPa, 0,42 MPa et 0,26 MPa respectivement, pour les taux de substitution croissants. Cela représente une diminution globale de 97% % de la résistance globale. Les bétons 300 kg/m³ de ciment, les valeurs obtenues sont de 3,88 MPa, 2,34 MPa, 1,05 MPa, 0,33 MPa et 0,16 MPa, traduisant une réduction globale de 95 % de la résistance globale. Pour un dosage de 250 kg/m³, les résultats sont de 3,77 MPa, 2,36 MPa, 0,79 MPa, 0,24 MPa et 0,21 MPa, soit une diminution de 94 % de la résistance globale.

En effet, selon Habert [36], l'incorporation de fibres végétales ou d'agrégats légers non réactifs entraîne généralement une baisse des performances mécaniques, en raison de : • La mauvaise adhésion fibre-matrice, • La présence de vides interconnectés, • La faible rigidité intrinsèque du renfort organique.

Les bétons à base de balle de riz suivent cette tendance observée pour d'autres matériaux biosourcés comme le chanvre [21] ou les pailles [37] où les résistances chutent souvent au-dessous de 1 MPa à partir de 50 % à 75 % de substitution. Béton de chanvre de 0.3 à 1.2 MPa [15], bétons de paille (50 %) 0.5 à 1.8 MPa [37] la forte réduction de la résistance à la compression dans les bétons contenant de la balle de riz reflète une adaptation vers des usages non structuraux (remplissage, isolation), et non des applications porteuses, ce qui est cohérent avec les observations de la littérature sur les bétons.

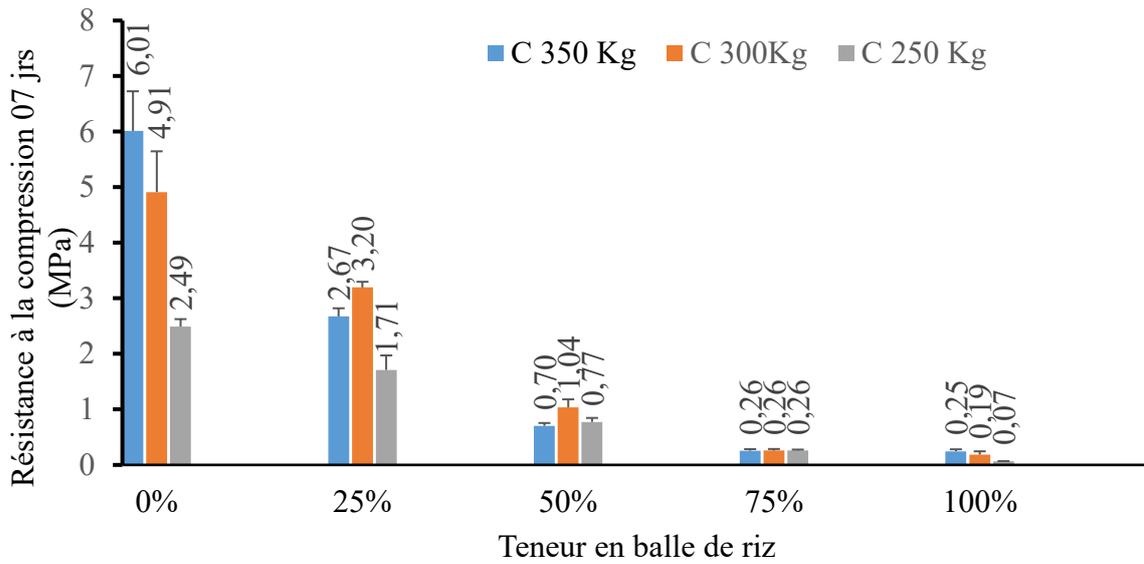


Figure 24 : résistance à la compression

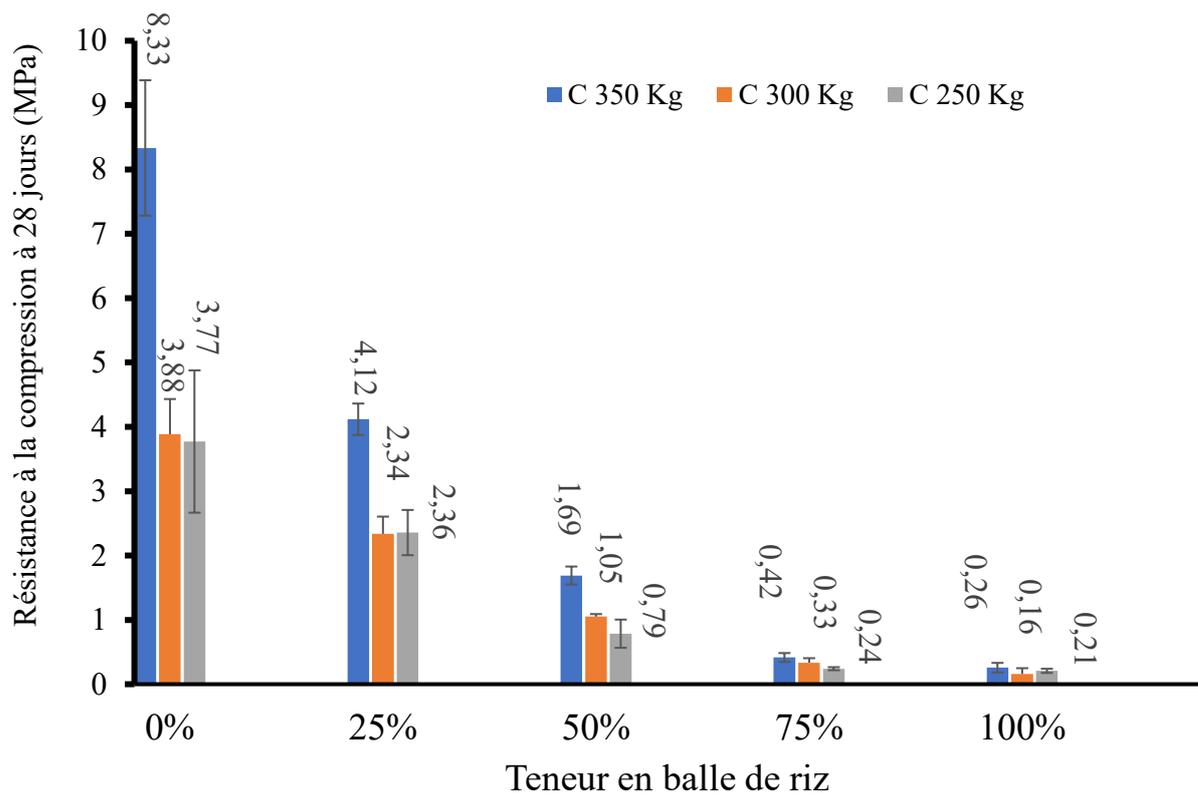


Figure 25 : résistance à la compression

III.5. Propriétés thermiques

Les bétons de balle de riz se distinguent par leurs propriétés thermiques. Leurs performances en matière de régulation thermique dépendent de paramètres fondamentaux tels que la conductivité, l'effusivité et la diffusivité thermique, qui définissent leur aptitude à transmettre, emmagasiner et répartir la chaleur. Plusieurs recherches ont mis en évidence que ces matériaux offrent de meilleures propriétés thermiques comparativement aux bétons conventionnels [4];[13],[10]. L'étude de ces caractéristiques s'avère donc essentielle pour évaluer leur efficacité en tant que solutions d'isolation dans le cadre d'une construction respectueuse de l'environnement.

III.5.1. Conductivité thermique

La **Figure 26** présente l'évolution de la conductivité thermique des bétons en fonction de l'incorporation progressive de balle de riz (0 %, 25 %, 50 %, 75 %, 100 %) dans trois formulations différenciées par leur teneur en ciment : 250, 300 et 350 kg/m³.

Pour un dosage de 350 kg/m³, les conductivités varient de 1,302 W/m·°C (0 % de balle de riz) à 0,102 W/m·°C (100 %), soit une réduction de 92 %. Avec 300 kg/m³, la conductivité diminue de 1,005 W/m·°C à 0,094 W/m·°C, soit 91 % de baisse. Enfin, à 250 kg/m³, les valeurs chutent de 0,978 W/m·°C à 0,090 W/m·°C, confirmant une réduction équivalente (91%). Cette tendance montre que l'ajout de balle de riz entraîne une diminution significative de la conductivité thermique, particulièrement marquée dès 25 % d'incorporation. À ce seuil, les baisses enregistrées sont de 0,47 W/m·°C, 0,505 W/m·°C et 1,106 W/m·°C pour les formulations à 250, 300 et 350 kg/m³ respectivement.

Ces résultats s'expliquent par la structure fibreuse, poreuse et peu dense de la balle de riz, qui perturbe la continuité de la matrice cimentaire et introduit des zones d'air immobile agissant comme isolant thermique. Ce comportement réduit la transmission de chaleur par conduction. Par ailleurs, les formulations à faible teneur en ciment présentent systématiquement des conductivités plus faibles que celles plus riches, à même taux de balle de riz. Cette différence est directement liée à une densité globale plus basse, qui limite les voies solides de transfert thermique.

À titre de comparaison, la conductivité thermique des matériaux varie fortement selon leur nature et leur structure interne. Le mortier de ciment ordinaire présente une conductivité

comprise entre 1 et 1,5 W/m·K, traduisant une forte capacité à transmettre la chaleur [18], [38]. En revanche, la balle de riz, matériau fibreux et peu dense, affiche une conductivité bien plus faible, généralement inférieure à 0,1 W/m·K [13], [6]. Le chanvre, quant à lui, présente une large plage de conductivité thermique, allant de 0,04 à 0,41 W/m·K, selon la densité du matériau et les paramètres de formulation [19], [21].

Les valeurs obtenues ici sont donc cohérentes avec celles issues des travaux antérieurs sur les matériaux biosourcés

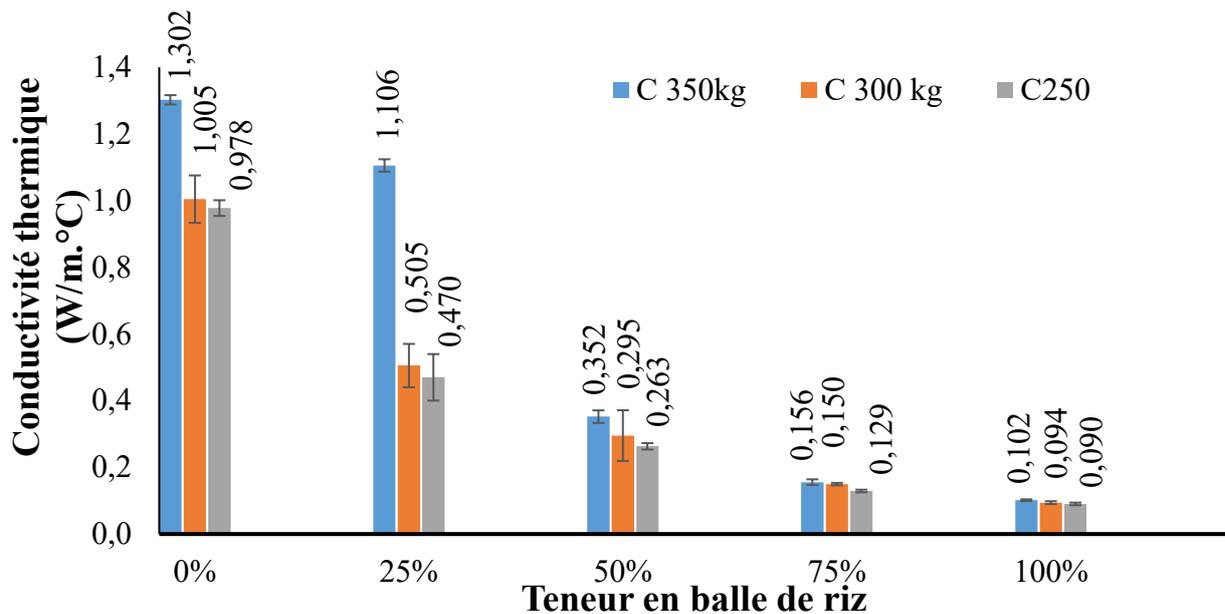


Figure 26 : Conductivité thermique

III.5.2. Diffusivité thermique

La Figure 27 montre l'évolution de la diffusivité thermique est présentée en fonction de l'incorporation croissante de balle de riz (0 %, 25 %, 50 %, 75 %, 100 %) dans trois formulations de béton différenciées par leur dosage en ciment : 250, 300 et 350 kg/m³.

Pour un dosage de 350 kg/m³, les valeurs mesurées sont respectivement de $7,90 \times 10^{-7}$, $7,64 \times 10^{-7}$, $5,54 \times 10^{-7}$, $3,87 \times 10^{-7}$ et $3,64 \times 10^{-7}$ m²/s, soit une baisse globale de 53 % entre 0 % et 100 % de balle de riz. Avec un dosage de 300 kg/m³, les valeurs passent de $7,53 \times 10^{-7}$ à $3,11 \times 10^{-7}$ m²/s, représentant une réduction de 59 %. Pour la formulation à 250 kg/m³, la diffusivité thermique diminue de $6,70 \times 10^{-7}$ à $2,90 \times 10^{-7}$ m²/s, soit une diminution totale de 56 %.

De manière générale, les bétons sans balle de riz affichent les plus fortes diffusivités thermiques, comprises entre $6,70 \times 10^{-7}$ et $7,90 \times 10^{-7}$ m²/s, ce qui traduit un comportement

caractéristique des matériaux compacts et denses, favorisant une transmission rapide de la chaleur.

L'incorporation de 25 % de balle de riz entraîne déjà une réduction significative, la diffusivité tombant à $5,69 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ pour la formulation à $250 \text{ kg}/\text{m}^3$, et à $6,45 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ pour celle à $300 \text{ kg}/\text{m}^3$. À mesure que la proportion de balle de riz augmente, cette diminution se poursuit, atteignant des valeurs comprises entre $2,90$ et $3,64 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ à 100 %.

Cette évolution s'explique par la structure poreuse, fibreuse et peu dense de la balle de riz, qui freine la diffusion de la chaleur dans la matrice cimentaire. Ce matériau agit comme barrière thermique, limitant le transfert par conduction grâce à l'air emprisonné dans ses interstices.

Les résultats obtenus s'inscrivent dans les ordres de grandeur rapportés dans la littérature :

- La diffusivité thermique des mortiers de ciment classiques se situe entre 5 et $8 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ [18],[39]
- Pour des bétons biosourcés à base de chanvre, Evrard [40] rapportent des valeurs comprises entre $1,68$ et $2,5 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, en cohérence avec les résultats observés pour les formulations les plus riches en balle de riz.

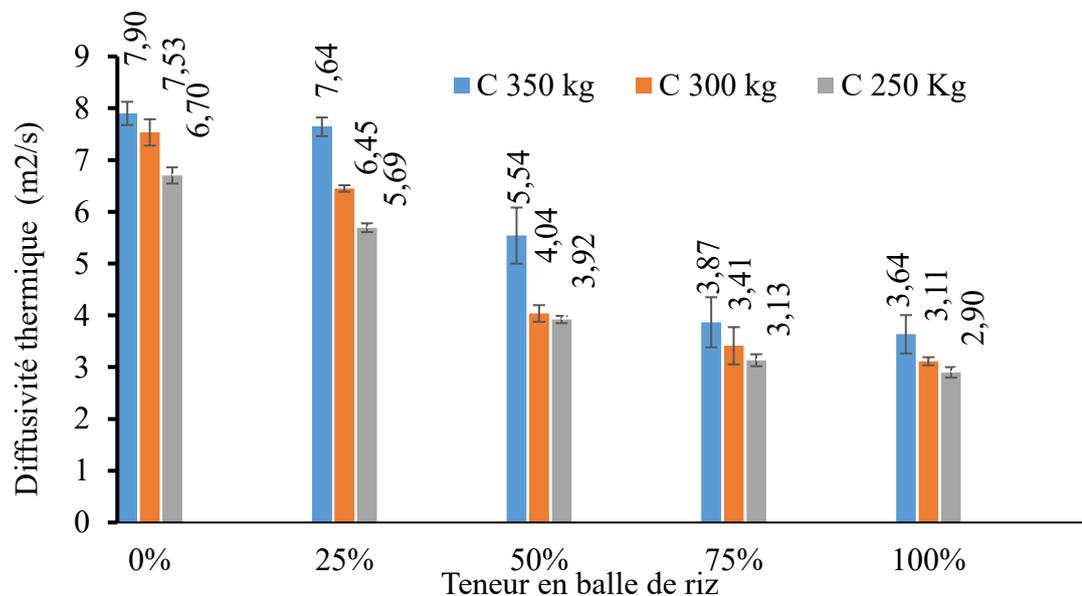


Figure 27 : Diffusivité thermique

III.5.3. Effusivité thermique

La **Figure 28** présente la variation de l'effusivité thermique en fonction des pourcentages croissants de balle de riz (0 %, 25 %, 50 %, 75 % et 100 %) intégrés dans trois formulations de béton, correspondant à des dosages en ciment de 250 kg/m³, 300 kg/m³ et 350 kg/m³.

Pour un dosage de 350 kg/m³, les valeurs mesurées sont de 1312 J/m²·°C·s^{0.5}, 1203 J/m²·°C·s^{0.5}, 525 J/m²·°C·s^{0.5}, 347 J/m²·°C·s^{0.5} et 218 J/m²·°C·s^{0.5}, correspondant à une baisse globale de 83 %. Les bétons dosés à 300 kg/m³ donnent les effusivités de 1245 J/m²·°C·s^{0.5}, 939 J/m²·°C·s^{0.5}, 486 J/m²·°C·s^{0.5}, 287 J/m²·°C·s^{0.5} et 197 J/m²·°C·s^{0.5}, soit une diminution de 84 %. Les bétons dosés à 250 kg/m³, donnent les valeurs de 1202 J/m²·°C·s^{0.5}, 880 J/m²·°C·s^{0.5}, 429 J/m²·°C·s^{0.5}, 237 J/m²·°C·s^{0.5} et 158 J/m²·°C·s^{0.5}, également avec une réduction totale de 86 %.

Les bétons présentant des valeurs élevées d'effusivité thermique, situées entre 1203,17 et 1312,00 J/m²·°C·s^{0.5}, témoignent d'un comportement caractéristique des matériaux lourds, capables d'absorber rapidement la chaleur et de la restituer tout aussi vite, comme c'est le cas des bétons traditionnels. L'introduction de 25 % de balle de riz entraîne une diminution sensible de cette propriété : l'effusivité thermique chute à 879,5 J/m²·°C·s^{0.5} pour la formulation contenant 250 kg/m³ de ciment, et à 938,67 J/m²·°C·s^{0.5} pour celle avec 300 kg/m³.

La diminution de l'effusivité résulte de l'effet combiné de la balle de riz, matériau isolant, et d'un dosage réduit en ciment, qui allège la matrice. Ainsi, le béton devient moins réactif aux variations rapides de température, ce qui améliore son confort thermique. La formulation à 250 kg/m³ se distingue par ses faibles échanges thermiques, la rendant particulièrement adaptée aux bâtiments passifs.

À titre de comparaison, les bétons fortement chargés en balle de riz (entre 75 % et 100 % de substitution du sable) présentent des effusivités thermiques proches de celles observées pour d'autres matériaux isolants biosourcés tels que les bétons de chanvre ou les bétons mousse. En effet, alors que les mortiers ciment classiques affichent des effusivités comprises entre 1200 et 1900 J·m⁻²·K⁻¹·s^{-1/2} [38], les bétons de chanvre présentent des valeurs plus faibles, allant de 189 à 248 J·m⁻²·K⁻¹·s^{-1/2} [40], tout comme les bétons mousse, dont l'effusivité varie entre 291 et 580 J·m⁻²·K⁻¹·s^{-1/2} [41]. Les valeurs obtenues dans cette étude pour les bétons à base de balle de riz s'inscrivent dans cette même tendance, soulignant leur aptitude à offrir un confort thermique satisfaisant. Ces résultats corroborent les conclusions de plusieurs travaux antérieurs

portant sur les matériaux biosourcés, et confirment le potentiel de la balle de riz comme composant pertinent pour la formulation de bétons à caractère isolant.

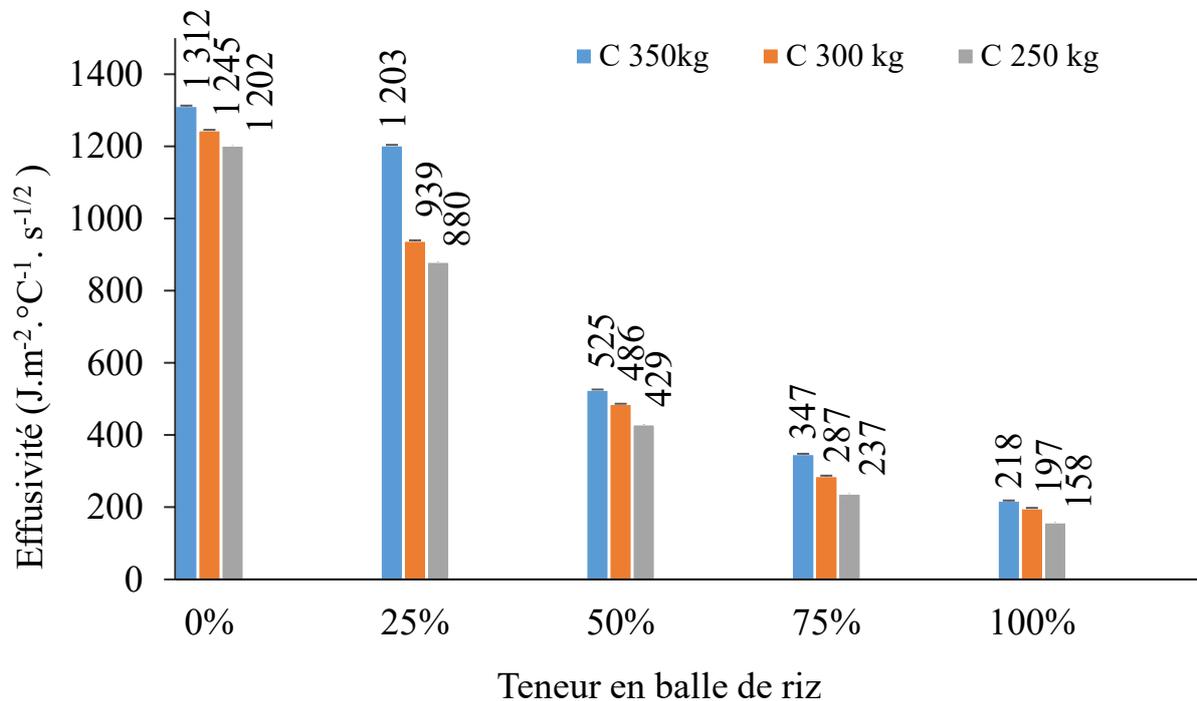


Figure 28 : effusivité thermique

III.6. Propriétés hygrométriques

Les bétons à base de balle de riz se distinguent par leurs propriétés hygrométriques. Leur comportement vis-à-vis de l'humidité dépend de paramètres fondamentaux tels que l'absorption, la perméabilité à la vapeur d'eau et les processus de sorption et désorption. Plusieurs recherches ont montré que ces matériaux présentent une capacité élevée à réguler l'humidité ambiante, ce qui constitue un avantage pour les constructions axées sur le confort intérieur et la durabilité des ouvrages [4], [13], [10]. L'étude de ces caractéristiques est donc primordiale pour évaluer leur efficacité en tant que matériaux de construction dans une approche respectueuse de l'environnement.

III.6.1. Perméabilité à la vapeur

Les **Figure 29** et **Figure 30** présentent l'évolution de la perméabilité en fonction de différentes proportions de balle de riz incorporée (0 %, 50 % et 100 %) dans une formulation unique de béton, correspondant à un dosage en ciment de 350 kg/m³. Il en ressort de ces résultats que l'augmentation de la teneur en balle de riz entraîne une élévation notable de la perméabilité à

la vapeur d'eau de 65,91%. Ce comportement est attendu, compte tenu de la structure poreuse et fibreuse de la balle de riz, qui facilite les échanges d'humidité avec l'environnement. Par ailleurs, cette plus grande perméabilité s'accompagne d'une moindre résistance au passage de la vapeur et l'augmentation de la balle de riz diminue la résistance globale de 65.91%. Ces observations sont cohérentes avec les résultats d'autres études, confirmant que l'incorporation de balle de riz améliore significativement la capacité des bétons à gérer les transferts d'humidité qui se rapproche de la laine minérale à un facteur de résistance de 1, les panneaux de laine de bois ($\mu=3$) ainsi que pour les fibres de cellulose en vrac de 2 car ces valeurs sont proches de la balle de riz qui est de 1.5 [10],[21].

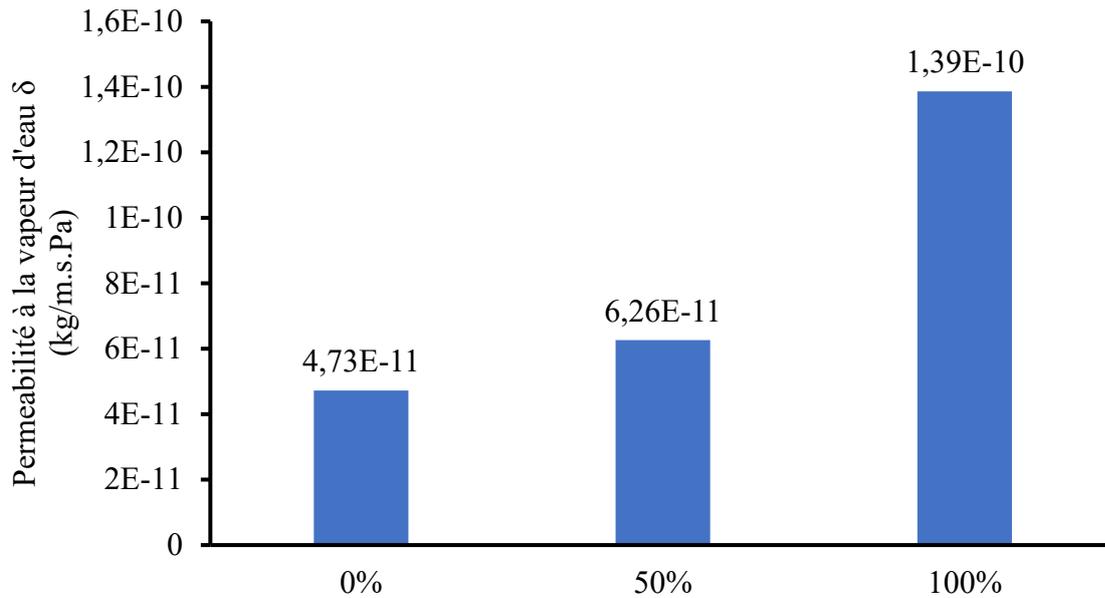


Figure 29 : Perméabilité à la vapeur d'eau

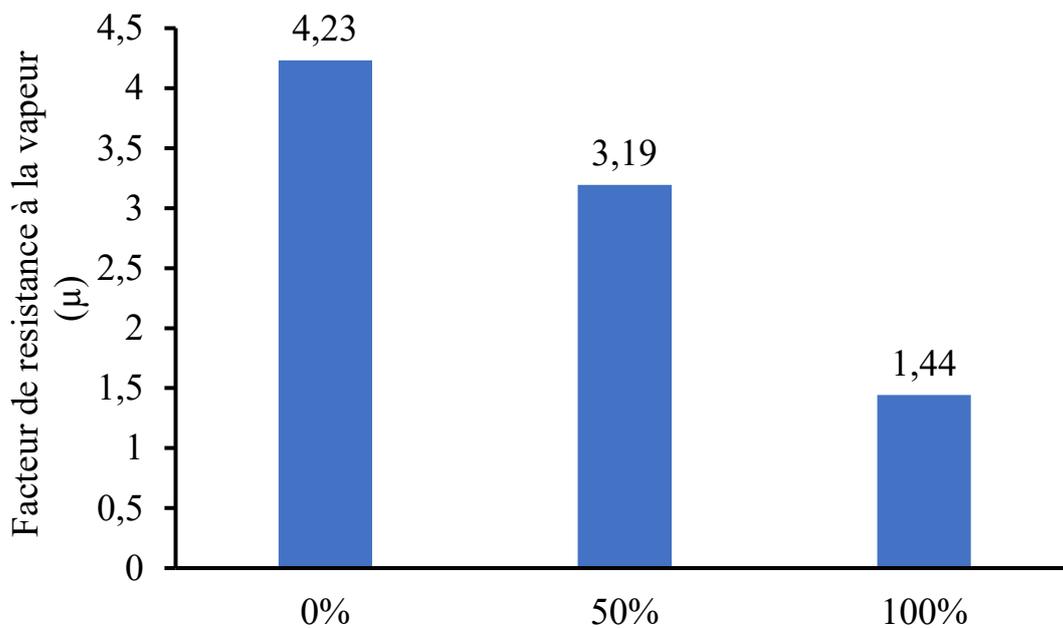


Figure 30 : Facteur de résistance

III.6.2. Sorption

La sorption d'humidité révèle le comportement hygrothermique des bétons biosourcés. Cette étude teste trois dosages de liant (250, 300 et 350 kg/m³) associés à cinq taux de remplacement par des granulats végétaux (0, 25, 50, 75 et 100 %). Chaque dosage en liants sera présente dans les **Figure 31**, **Figure 32** et **Figure 34** Les isothermes ainsi obtenus seront comparés aux classifications IUPAC afin de préciser l'influence croisée du liant et de la fraction biosourcée sur la capacité d'adsorption.

Les figures présentent :

- 0 % : Courbe à faible pente avec une légère inflexion, correspondant à un isotherme de type II, caractéristique d'une matrice cimentaire dense présentant une porosité limitée.
- 25 % : Comportement similaire à celui de 0 %, avec une faible pente et une légère inflexion. L'isotherme reste de type II, traduisant une surface légèrement plus développée, mais toujours pauvre en mésopores.
- 50 % : Apparition d'une sigmoïde discrète. Le comportement reste de type II, suggérant une surface spécifique accrue, bien que la porosité mésoscopique reste modérée.
- 75 % : La courbe montre une montée rapide au-delà de 60 % d'humidité relative, typique d'un isotherme de type IV, indiquant une condensation capillaire dans un réseau mésoporeux plus développé.
- 100 % : Forte pente dès les faibles humidités (dès 10 % HR), avec un comportement intermédiaire entre les types II et IV, révélant une structure très ouverte et hautement poreuse, favorable à la condensation de la vapeur d'eau

Pour le béton dosé à 350 kg/m^3 de ciment, la sorption atteint 10.40% à 26.53% avec 0 à 100% balle de riz à la saturation à 97% d'humidité relative, les bétons dosés à 300 kg/m^3 de ciment, la sorption atteint 5.23 % à 54.21% avec 0 à 100% balle de riz à la saturation à 97% d'humidité relative, Pour le béton dosé à 300 kg/m^3 de ciment, la sorption atteint 6.23 % à 154.21% avec 0 à 100% balle de riz à la saturation à 97% d'humidité relative. Ces valeurs sont en parfaite adéquation avec la littérature [19],[21].

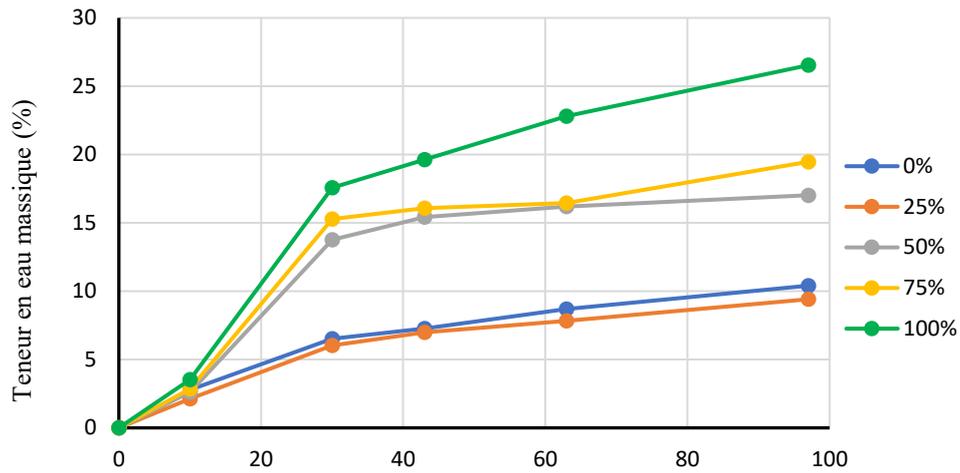


Figure 31 : Humidité relative (0-97%) pour béton dosé à 350 kg/m³

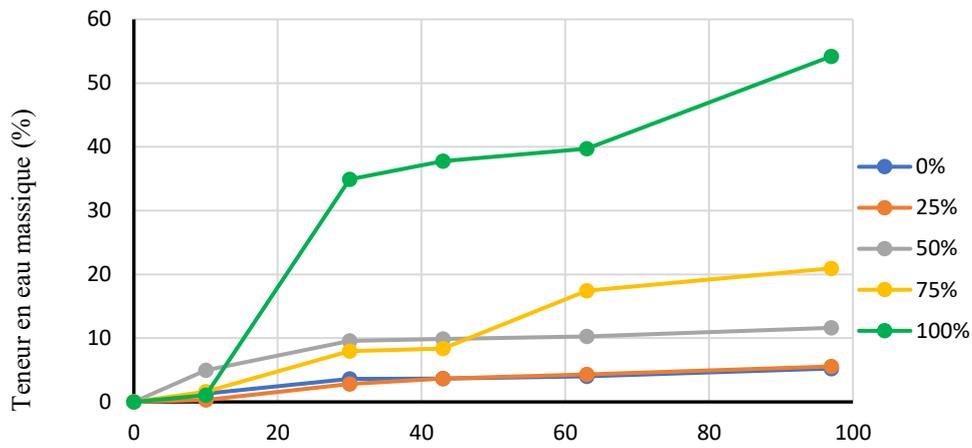


Figure 34 : Humidité relative (0-97%) pour béton dosé à 300 kg/m³

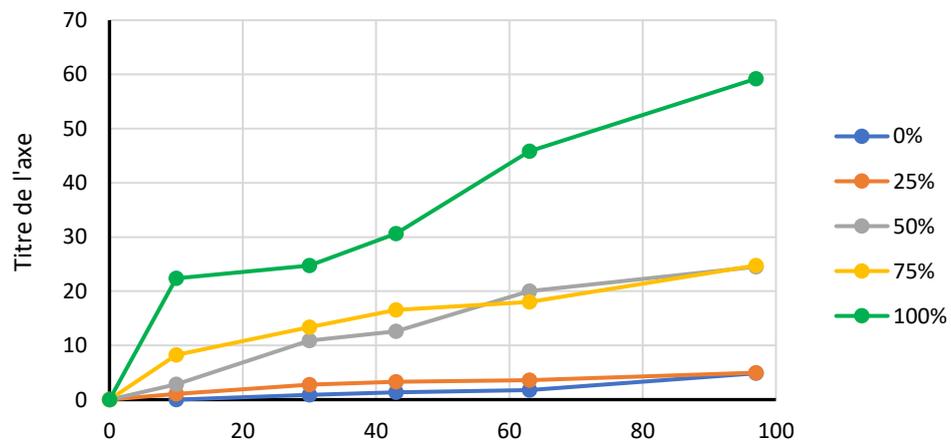


Figure 32 : Humidité relative (0-97%) pour béton dosé à 250 kg/m³

III.7. Conclusion partielle

L'analyse des résultats expérimentaux met en lumière la portée élargie du protocole de formulation employé, lequel excède les objectifs initiaux en offrant une flexibilité interprétative adaptée à une pluralité d'usages. La pluralité des combinaisons testées autorise l'élaboration de formulations optimisées, calibrées selon des critères de performance ciblés qu'ils soient d'ordre mécanique, thermique ou hygrothermique.

En conséquence, les données empiriques obtenues permettent non seulement d'identifier des compositions à haute valeur fonctionnelle, mais également de positionner toute nouvelle formulation dans un référentiel de performance préétabli, facilitant ainsi sa transposition à des contextes spécifiques d'utilisation.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Cette étude a permis la réalisation des Formulations et caractérisations hygrothermiques et physico-mécaniques d'un béton biosourcé à base de balle de riz. L'analyse approfondie des propriétés physiques, mécaniques et thermiques a permis de dégager des résultats significatifs quant au potentiel de ce matériau biosourcé.

Sur le plan physique, les composites incorporant 100% des balles de riz présentent une porosité élevée et un taux d'absorption important, principalement attribuables à la structure fibreuse et poreuse des balles de riz. Ces caractéristiques influent directement sur la densité des matériaux, qui reste inférieure à 2000 kg/m³, classant ces composites dans la catégorie des bétons légers.

Les performances mécaniques révèlent un comportement différencié : si les fibres de balle de riz induisent des changements significatifs sur la résistance en flexion, une baisse notable de la résistance en compression, quel que soit l'âge du matériau. Cette limitation oriente l'utilisation de ces composites vers des fonctions non porteuses, en particulier comme matériaux de remplissage dans des structures à ossature.

D'un point de vue thermique, les résultats indiquent une capacité accrue de rétention de chaleur et une meilleure régulation des variations thermiques, comparativement aux bétons classiques. Ces performances traduisent un potentiel d'amélioration du confort thermique intérieur et une réduction des besoins en climatisation, en ligne avec les objectifs d'efficacité énergétique des bâtiments durables.

Cependant, bien que prometteur, ce matériau nécessite encore des investigations complémentaires. Des études futures devraient explorer :

- Le comportement à long terme (vieillesse) du composite,
- Sa capacité d'isolation acoustique,
- Et son éventuel usage en tant qu'élément porteur, moyennant des optimisations structurelles.

En conclusion, les composites à base de balle de riz-sable-ciment présentent des caractéristiques intéressantes pour des usages ciblés en construction durable. Ils offrent une voie de valorisation pour un résidu agricole local, tout en répondant aux enjeux contemporains d'écoconception, de performance énergétique et de réduction de l'impact environnemental du secteur du bâtiment.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] « Policy recommendations for the zero energy building promotion towards carbon neutral in Asia-Pacific Region », *Energy Policy*, vol. 159, p. 112661, déc. 2021, doi: 10.1016/j.enpol.2021.112661.
- [2] M. Amran *et al.*, « Rice Husk Ash-Based Concrete Composites: A Critical Review of Their Properties and Applications », *Crystals*, vol. 11, n° 2, p. 168, févr. 2021, doi: 10.3390/cryst11020168.
- [3] D. AYITE « utilisation des betons de balles de riz pour la preffabrication des entrevous des planchers de batiments » these de doctorat 2011.
- [4] N. Belayachi, M. Bouasker, D. Hoxha, et M. Al-Mukhtar, « Béton à base de paille pour l'isolation thermique : Etude expérimentale des propriétés mécaniques et thermiques », in *deuxième conférence scientifique internationale "creation des grandes socio-ecocomplexes en ukraine en cadre de la conception de developpement durable"*, Crimée, Ukraine, mai 2013. Consulté le: 17 avril 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://hal.science/hal-00836712>
- [5] G. Messara Sammoun, « Étude des bétons faits avec des granulats biosourcés », Bachelor thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2017. Consulté le: 5 février 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/114206>
- [6] M. M. Bart *et al.*, « caracterisation hydrique et thermique de materiaux de genie civil a faibles impacts environnementaux »these de doctorat .
- [7] C. Hollestelle, « Valorisation de co-produits végétaux de l'industrie agro-alimentaire pour la stabilisation d'émulsions Clean-Label », thesis, université Paris-Saclay, 2024. Consulté le: 17 avril 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://theses.fr/2024UPASB007?utm>
- [8] F. D. Igue, « Optimisation des performances hygrothermiques de parois en bétons biosourcés : Approche expérimentale et numérique », thesis, Amiens, 2023. Consulté le: 17 avril 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://theses.fr/s259516>
- [9] M. Charai, « Conception et caractérisation de nouveaux éco-matériaux biosourcés pour une construction durable de bâtiments », thesis, Paris Est, 2021. Consulté le: 17 avril 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://theses.fr/2021PESC0068?utm>
- [10] F. Collet, « *Matériaux biosourcés à hautes performances hygrothermiques : caractérisation expérimentale de l'échelle du matériau à l'échelle de la paroi*, Habilitation à diriger des recherches, Université de Rennes 1, France, juin 2018».
- [11] M. Chabannes, « Formulation et étude des propriétés mécaniques d'agrobétons légers isolants à base de balles de riz et de chènevotte pour l'éco-construction ».
- [12] V. Nozahic, « Vers une nouvelle démarche de conception des bétons de végétaux lignocellulosiques basée sur la compréhension et l'amélioration de l'interface liant / végétal: application à des granulats de chenevotte et de tige de tournesol associés à un liant ponce / chaux ».
- [13] M. Chabannes, « Formulation et étude des propriétés mécaniques d'agrobétons légers isolants à base de balles de riz et de chènevotte pour l'éco-construction ».

- [14] E. Chabi, « Étude de la formulation et des propriétés mécaniques et thermiques du béton de balles de riz », thesis, Université de Lorraine, 2017. Consulté le: 30 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://theses.fr/2017LORR0232?utm>
- [15] S. Elfordy, F. Lucas, F. Tancret, Y. Scudeller, et L. Goudet, « Mechanical and thermal properties of lime and hemp concrete (“hemcrete”) manufactured by a projection process », *Construction and Building Materials*, vol. 22, n° 10, p. 2116-2123, oct. 2008, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2007.07.016.
- [16] A. Laborel-Préneron, C. Magniont, et J.-E. Aubert, « Hygrothermal properties of unfired earth bricks: Effect of barley straw, hemp shiv and corn cob addition », *Energy and Buildings*, vol. 178, p. 265-278, nov. 2018, doi: 10.1016/j.enbuild.2018.08.021.
- [17] C. Rode *et al.*, « NORDTEST Project on Moisture Buffer Value of Materials: AIVC Conference ‘Energy performance regulation’: Ventilation in relation to the energy performance of buildings », *AIVC 26th conference*, p. 47-52, 2005.
- [18] F. Alassaad, « Stockage d’énergie thermique dans des enveloppes hygroscopiques à base de matériaux biosourcés », These de doctorat, Normandie, 2022. Consulté le: 17 avril 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://theses.fr/2022NORMC242>
- [19] C. Véronique, « Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d’un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique ».
- [20] L. Arnaud et E. Gourlay, « Experimental study of parameters influencing mechanical properties of hemp concretes », *Construction and Building Materials*, vol. 28, n° 1, p. 50-56, mars 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.07.052.
- [21] C. Florence et P. Sylvie, « variation de la capacité hydrique tampon de bétons de chanvre en fonction de la formulation ».
- [22] F. Collet, J. Chamoin, S. Pretot, et C. Lanos, « Comparison of the hygric behaviour of three hemp concretes », *Energy and Buildings*, vol. 62, p. 294-303, juill. 2013, doi: 10.1016/j.enbuild.2013.03.010.
- [23] R. Chlela, « Durabilité d’un système composite biosourcé (matrice époxy-fibres de lin) pour applications de renforcement structural : approches expérimentale et fiabiliste », phdthesis, Université Paris-Est, 2019. Consulté le: 5 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://theses.hal.science/tel-02894653>
- [24] A. D. Tran Le, C. Maalouf, T. H. Mai, E. Wurtz, et F. Collet, « Transient hygrothermal behaviour of a hemp concrete building envelope », *Energy and Buildings*, vol. 42, n° 10, p. 1797-1806, oct. 2010, doi: 10.1016/j.enbuild.2010.05.016.
- [25] T.-T. Nguyen, Picandet ,Vincent, Amziane ,Sofiane, et C. and Baley, « Influence of compactness and hemp hurd characteristics on the mechanical properties of lime and hemp concrete », *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol. 13, n° 9, p. 1039-1050, oct. 2009, doi: 10.1080/19648189.2009.9693171.
- [26] M. Lawrence, A. Shea, P. Walker, et P. De Wilde, « Hygrothermal performance of bio-based insulation materials », *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials*, vol. 166, n° 4, p. 257-263, août 2013, doi: 10.1680/coma.12.00031.
- [27] C. Cronauer *et al.*, « Climate risk analysis for adaptation planning in Madagascar’s agricultural sector ».

- [28] AFNOR « NF P 18-423 :1981 - Béton : 1981_mise en place par piquage » Association Française de Normalisation (AFNOR), Paris, France, décembre 1981.
- [29] AFNOR « NF P 94-056:1996_Analyse granulométrique, Sols : reconnaissance et essais » Association Française de Normalisation (AFNOR), Paris, France, mars 1996.
- [30] AFNOR « EN 12390-3 :2003_ essai pour béton durci - Partie 3 : Résistance à la compression des éprouvettes » Association Française de Normalisation (AFNOR), Paris, France, févr. 2003
- [31] AFNOR « NF EN 12390-5_Octobre 2000_ essai pour béton durci : Partie 5 : Résistance à la flexion sur éprouvettes » AFNOR, 17 octobre 2000. Norme nationale reprise de EN 12390-5 :2000.
- [32] AFNOR « NFP-18-459_Mars2010_beton, essai pour béton durci, essai de porosité et de masse volumique » Paris : AFNOR éditions, mars 2010..
- [33] « SIST.SIST-EN 772-11-2011 - Methods of Test for Masonry Units – Part 11 : Determination of Water Absorption Due to Capillary Action and Initial Rate of Water Absorption Slovensko standardizacijsko telo, Ljubljana, 1 July 2011. ».
- [34] AFNOR « NF EN 196-1-Méthodes d'essais des ciments-Partie 1 Détermination des résistances mécaniques » Paris : AFNOR, 2006. Version adoptée de l'EN 196-1 :1994 (sup. en 2016)..
- [35] Izard, J-L, (2006, juillet). « *L'inertie thermique dans le bâtiment – Principe de superposition* [Note technique] École d'Architecture de Marseille-Luminy / Enrobât-Méditerranée]
- [36] « NBN EN ISO 12571-2000-Hygrothermal Performance of Building Materials and Products : Determination of Hygroscopic Sorption Properties » (ISO 12571 :2000). Bruxelles : NBN, 2000 (retirée en 2013).
- [37] N. Benmansour, B. Agoudjil, A. Gherabli, A. Kareche, et A. Boudenne, « Thermal and mechanical performance of natural mortar reinforced with date palm fibers for use as insulating materials in building », *Energy and Buildings*, vol. 81, p. 98-104, oct. 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.05.032.
- [38] B. Mazhoud, « Elaboration et caractérisation mécanique, hygrique et thermique de composites bio-sourcés » PhD diss., INSA Rennes (Université de Rennes 1), December 2017.
- [39] P. Shafigh, I. Asadi, A. R. Akhiani, N. B. Mahyuddin, et M. Hashemi, « Thermal properties of cement mortar with different mix proportions », *Materiales de Construcción*, vol. 70, n° 339, Art. n° 339, sept. 2020, doi: 10.3989/mc.2020.09219.
- [40] A. Evrard, « Transient hygrothermal behaviour of Lime-Hemp Materials », PhD diss., Université catholique de Louvain, 2008 <https://dial.uclouvain.be/pr/boreal:19675>
- [41] A. L. Ouedraogo *et al.*, « Thermo-Physical, Mechanical and Hygro-Thermal Properties of Newly Produced Aerated Concrete », *JMSSE*, vol. 8, n° 2, p. 1021-1028, 2021, doi: 10.52687/2348-8956/823.