

Utilisation Combinée Des Pailles De Riz, De La Cendre De Tourbe Et De La Poudre Fine De Coquillages Pour La Biostabilisation Des Briques De Terre Comprimée.

RAKOTOMALALA Zolimboahangy¹, RAHARINIERANA Hantaniaina¹

Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo – Ecole Doctorale Sciences et Techniques de l'Ingénierie et de l'Innovation – Université d'Antananarivo, Madagascar

BP 1500 Antananarivo 101 Madagascar

Auteur correspondant : RAKOTOMALALA Zolimboahangy

Email : zoly.rakotomalala@gmail.com



Résumé : Cette étude examine l'efficacité de la bio stabilisation dans l'amélioration des briques de terre comprimée (BTCs), en valorisant des matières premières locales telles que la latérite, la cendre de tourbe et la poudre de coquillage. À travers des formulations expérimentales intégrant le *Bacillus subtilis*, certaines combinaisons atteignent des performances conformes aux normes de construction : résistance à la compression supérieure à 2 MPa, absorption d'eau inférieure à 5 %, et stabilité hygroscopique renforcée. Ces formulations surpassent les témoins non stabilisés en milieu humide, tout en conservant une cohésion mécanique durable après immersion et cycles humidité-séchage. L'approche adoptée favorise la valorisation de ressources locales et de déchets agro-industriels, réduisant les coûts de production et l'empreinte environnementale. Les résultats confirment que la synergie entre stabilisants minéraux et bio stabilisants microbiens améliore la compacité, la durabilité et la régulation hydrique des BTCs. Cette recherche ouvre des perspectives pour l'optimisation des paramètres biologiques, la diversification des matières premières, et l'application à grande échelle dans des contextes géotechniques variés. Elle s'inscrit dans une dynamique de construction durable adaptée aux réalités climatiques de Madagascar, et contribue à l'élaboration de programmes académiques certifiants en ingénierie des matériaux écologiques.

Mots clés: Latérite - *Bacillus subtilis* - Cendre de tourbe - Poudre de coquillages - Briques de terre comprimée (BTC) - Biostabilisation - Construction durable

Abstract: This study examines the effectiveness of biostabilization in enhancing compressed earth blocks (CEBs), through the valorization of local raw materials such as laterite, peat ash, and seashell powder. Experimental formulations incorporating *Bacillus subtilis* demonstrate that certain combinations achieve performance levels compliant with construction standards: compressive strength exceeding 2 MPa, water absorption below 5%, and improved hygroscopic stability. These formulations outperform unstabilized control samples in humid environments, while maintaining durable mechanical cohesion after immersion and wet-dry cycling. The adopted approach promotes the use of local resources and agro-industrial waste, thereby reducing production costs and environmental impact. Results confirm that the synergy between mineral stabilizers and microbial biostabilizers significantly enhances the compactness, durability, and moisture regulation of CEBs. This research opens avenues for optimizing biological parameters, diversifying local materials, and scaling applications across varied geotechnical contexts. It aligns with a sustainable construction dynamic tailored to Madagascar's climatic realities and contributes to the development of certifying academic programs in ecological materials engineering.

Keywords: Laterite - *Bacillus subtilis* - Peat Ash - Shell Powder - Compressed Earth Bricks (CEB) - Biostabilization - Sustainable Construction

1. Introduction

Les matériaux locaux offrent une opportunité unique pour répondre aux besoins croissants de construction durable tout en minimisant l'impact environnemental. Parmi ces matériaux, les briques de terre comprimée (BTCs) se distinguent par leur potentiel à intégrer des stabilisants naturels et biologiques pour améliorer leurs performances mécaniques et durabilité.

Dans cette étude, nous explorons la valorisation des ressources locales telles que la latérite, la cendre de tourbe, et la poudre fine issue des déchets de coquillages, combinées à une activation biologique innovante par le *Bacillus subtilis*. Ces composants, accessibles et économiques, visent à remplacer ou compléter les stabilisants traditionnels, tels que le ciment et la chaux, souvent coûteux et polluants en termes d'empreinte carbone et du dégagement des gaz à effet de serre lors de leur production. L'objectif est de démontrer que l'intégration des stabilisants naturels et biologiques peut améliorer significativement la résistance, la durabilité et l'imperméabilité des BTC tout en respectant les exigences normatives.

L'approche expérimentale comprend la caractérisation des matières premières, l'optimisation des formulations, et l'évaluation des performances mécaniques, physiques, durabilité et hygroscopiques des BTCs. En s'inscrivant dans une démarche d'économie circulaire et d'écoresponsabilité, cette étude met en lumière une voie prometteuse pour réduire la dépendance aux liants classiques tout en valorisant les ressources locales.

2. Présentation des matières premières

2.1 Latérite

2.1.1 Origine

La latérite examinée dans cette étude provient du fokontany Mangatany, situé dans la commune d'Arivonimamo, plus précisément dans la zone de Fieferamanga (coordonnées : 19°01' Sud et 47°15' Est), Région Itasy, Province Antananarivo.

Son extraction s'est effectuée dans des secteurs présentant des conditions géotechniques favorables, où les formations géologiques offrent une stabilité notable.

La composition riche en oxydes de fer confère à ce matériau sa caractéristique teinte rougeâtre.



Figure 1 : Localisation du prélèvement de l'échantillon



Figure 2 : Échantillon de latérite

2.1.2 Caractéristiques

- **Poids spécifiques** : les mesures effectuées révèlent un poids spécifique moyen de $25,41 \text{ kN/m}^3$ et une teneur en eau naturelle de 18,3 %. Ces valeurs s'inscrivent dans les plages caractéristiques des sols argileux ou argilo-limoneux, qu'ils soient compactés ou naturellement denses, avec un poids spécifique généralement compris entre 20 et 28 kN/m^3 .
- **Analyse granulométrique** : l'analyse granulométrique met en évidence une dominance de particules fines dans l'échantillon de sol. In situ, la latérite se distingue par une texture argilo-limoneuse, marquée par une proportion significative de fines.

- **Limites d'Atterberg** : l'indice de plasticité ($I_p = 20,47 \%$) et la limite de liquidité ($\omega_L = 46,6 \%$) indiquent que ce sol relève de la catégorie des argiles plastiques, selon le diagramme de Cassagharde.

- **Classification** : en se basant sur ces résultats, la latérite peut être classée selon plusieurs référentiels:

- HRB : A-6, sol argileux plastique
- LPC : Ap, argile plastique
- GTR_2023 : F2, sol argilo-limoneux

- **Compactage** : les études de compactage fournissent des données précises :

- Les essais Proctor indiquent des valeurs optimales de compactage avec une teneur en eau optimale de 20,4 % et une densité sèche maximale de 17,52 kN/m³. Ces valeurs confirment la nature argileuse ou limoneuse de la latérite, nécessitant une humidité relativement élevée pour atteindre une compacité optimale.
- La valeur de l'I.C (Indice Californien) de 16 kgf/cm² met en évidence une capacité portante satisfaisante, adéquate pour des structures telles que fondations ou routes. Cette résistance est d'autant plus consolidée par une teneur élevée en oxydes de fer (28,1 %), qui contribue à la solidité et à la durabilité du sol.

- **Analyse chimique** : l'analyse chimique effectuée sur la latérite a permis d'établir les concentrations suivantes :

Tableau 1: Résultats de l'analyse chimiques de la latérite

Composant chimique	Concentration en masse (%)
Silice (SiO ₂)	39,4
Alumine (Al ₂ O ₃)	24,6
Oxyde de fer (Fe ₂ O ₃)	28,1
Dioxyde de titane (TiO ₂)	2,5
Oxyde de calcium (CaO)	1,2
Oxyde de magnésium (MgO)	0,9
Oxyde de potassium (K ₂ O)	0,7
Oxyde de sodium (Na ₂ O)	0,3
Perte au feu (LOI)	5,8

2.2 Paille de riz et la culture microbienne

La paille de riz, sous-produit de la culture du riz, se distingue par sa structure fibreuse et légère. Ses propriétés naturelles en font un matériau prometteur pour la stabilisation des briques de terre comprimée (BTC). Elle héberge spontanément des micro-organismes capables de précipiter le carbonate de calcium, parmi lesquels figurent les bactéries du genre *Bacillus*.

2.2.1 Origine

La paille de riz employée dans cette étude provient des rizières, où son abondance garantit un approvisionnement durable et économique. Sa valorisation dans le domaine de la construction contribue à réduire les pratiques polluantes tout en favorisant une approche circulaire du bâti.

2.2.2 Culture de *Bacillus subtilis* à partir de la paille de riz

- L'isolement et la culture de *Bacillus subtilis* suivent un protocole rigoureux basé sur une sélection minutieuse des matières premières (paille de riz, excréments dilués, eau distillée et chaux). Le processus comprend trois étapes essentielles : préparation des matières premières, élaboration du milieu de culture, incubation et fermentation. Maintenu entre 30 et 37 °C durant 48 heures, cette culture produit une solution microbienne active, directement exploitable pour optimiser la stabilisation des BTC.

- L'identification visuelle des microbes dans la paille de riz

La présence de *Bacillus subtilis* dans la paille de riz peut être identifiée par deux signes caractéristiques :

- Odeur de fermentation : La production de composés volatils par fermentation bactérienne génère une odeur spécifique. Ces métabolites secondaires, propres à *Bacillus subtilis*, signalent une activité biologique intense.
- Précipitation calcaire : Une légère précipitation de carbonate de calcium (CaCO_3) apparaît au fond du récipient. Ce phénomène, lié à l'urée-hydrolyse enzymatique, est favorisé par l'ammoniac qui augmente le pH du milieu :

Légère précipitation calcaire au fond du récipient : Ce phénomène est dû à l'activité enzymatique de la bactérie, en particulier l'urée-hydrolyse :



Ensuite, l'ammoniac (NH_3) augmente le pH du milieu, favorisant la précipitation du carbonate de calcium (CaCO_3) à partir des ions calcium présents :



Le CaCO_3 précipité apparaît sous forme de dépôt blanc au fond du récipient, indiquant la présence de *Bacillus subtilis* et son activité biologique.

2.3 Cendre de tourbe

2.3.1 origine

Les cendres utilisées proviennent de la combustion de la tourbe, employée, comme combustible dans la fabrication de briques en terre cuite. Une fois récupérées sur le site de production, elles sont soumises à un traitement d'activation afin d'optimiser leurs propriétés.

La cendre est broyée puis tamisée à l'aide d'un tamis d'ouverture de 0,2 mm pour éliminer les particules résiduelles et grossières.

2.3.2 activation thermique à 750 °C

La cendre tamisée est ensuite soumise à un traitement thermique à 750 °C. Cette activation permet de maximiser la concentration en oxydes actifs, notamment la silice (SiO_2) et l'alumine (Al_2O_3). Ceci optimise les propriétés stabilisantes de la cendre et la rend adaptée à son utilisation dans les BTC.



Figure 3: Cendre de tourbe broyée et tamisée

2.4 Poudre de coquillages

2.4.1 Origine

La poudre de coquillages résulte de la valorisation des déchets industriels et alimentaires, principalement issus des régions côtières. Ces coquillages, généralement rejetés en grande quantité, constituent une source abondante de carbonate de calcium (CaCO_3).

Après un nettoyage minutieux, les coquillages sont broyés, puis tamisés pour éliminer les impuretés. La poudre obtenue est tamisée à 0,2 mm afin d'assurer une granulométrie fine et homogène.

2.4.2 Activation thermique

La poudre tamisée est portée à une température de 900°C pendant 2 heures, permettant la transformation du carbonate de calcium



Figure 4: coquillages concassés - broyés – tamisés

3. Méthodologie

3.1 Études préliminaires des formulations

Avant d'initier la fabrication des briques de terre comprimée, une série d'études préliminaires est nécessaire afin d'optimiser la formulation du mélange. Cela implique :

- La détermination des proportions optimales des matériaux,
- Le choix des paramètres d'expérimentation,
- L'évaluation des caractéristiques mécaniques et physiques du matériau stabilisé.

3.2 Plan d'expérimentation

L'étude repose sur des matrices expérimentales intégrant des variations de formulations et de conditions de fabrication, afin d'identifier les combinaisons les plus performantes en termes de résistance, durabilité et mise en œuvre. Dans cette étude, différentes formulations ont été élaborées afin d'identifier la combinaison optimale offrant le meilleur équilibre entre :

- Résistance mécanique,
- Durabilité et les propriétés hygroscopiques,
- Facilité de mise en œuvre.

Deux séries d'échantillons ont été préparées :

- Éprouvettes témoins : elles servent de référence et intègrent un stabilisant chimique (ciment ou chaux).

- Éprouvettes expérimentales : elles intègrent des stabilisants biologiques et minéraux, afin d'évaluer leur influence sur les performances des BTCs.

3.2.1 Formulations des éprouvettes Témoins

Les éprouvettes témoins, sélectionnées sur la base d'études bibliographiques démontrant des résultats satisfaisants, incluent une stabilisation chimique à l'aide de ciment et/ou de chaux, selon les proportions suivantes :

Tableau 2 : Formulation des éprouvettes témoins

Échantillon	Ciment (%)	Chaux (%)	Latérite (%)	Sable (%)	Eau (%)
T1	6	-	56	20	18
T2	-	10	52	20	18

Ces formulations constituent une base de comparaison entre les stabilisations chimiques conventionnelles et les formulations innovantes testées dans cette étude.

3.2.2 Formulations avec Variation des stabilisants biologiques et Minéraux

Dans cette deuxième série d'essais, la teneur en ciment ou en chaux est remplacée par des stabilisants naturels tels que la cendre de tourbe (CT) et la poudre de coquillages (PQ), afin d'évaluer leur potentiel en tant qu'alternatives aux liants classiques. Les proportions de stabilisants sont fixées à 10 % et la solution de gâchage à 18 %.

Tableau 3 : Formulation avec variation des stabilisants biologiques et minéraux:

Échantillon	Latérite (%)	Sable (%)	CT (%)	PQ (%)	Eau (%)	Solution avec <i>Bacillus subtilis</i>
E1	52	20	0	10	18	-
E2	52	20	5	5	18	-
E3	52	20	10	0	18	-
E4	52	20	0	10	-	18
E5	52	20	5	5	-	18
E6	52	20	10	0	-	18

3.3 Essais expérimentaux

Dans le cadre de cette étude sur la biopolymérisation des BTCs à base de latérite, sable, paille de riz, cendre de tourbe et poudre fine de coquillages, plusieurs essais ont été conduits afin de caractériser les performances physiques, hydriques, mécaniques, durabilité et hygroscopiques des formulations.

- Essais physiques :

- Densité humide et sèche : pour évaluer la compacité et la qualité du compactage.
- Porosité : pour analyser la structure interne et la sensibilité à l'eau.

- Essais hydriques

- Absorption d'eau : pour mesurer la perméabilité et la résistance à l'humidité.
- Comportement après immersion : pour tester la stabilité en milieu humide.

- Essais mécaniques

- Résistance à la compression à 14 jours : pour évaluer la prise initiale.

- Résistance à la compression à 28 jours : pour juger de la performance structurelle.
- Résistance après immersion : pour tester la tenue en conditions saturées.

- Essais de durabilité

- Cycles humidité-séchage : pour observer la perte de masse, la fissuration et la variation de résistance.
- Vieillissement accéléré : pour observer le comportement face aux intempéries.
- Gel-dégel : pour tester la résistance

3.4 Paramètres d'expérimentation

Pour garantir des propriétés mécaniques optimales aux briques de terre comprimée, plusieurs paramètres clés ont été définis et contrôlés au cours du processus de fabrication. Ceux-ci incluent :

- Le taux d'humidité optimal du mélange,
- La pression de compactage appliquée,
- Le temps de stabilisation, permettant d'évaluer l'évolution des caractéristiques mécaniques des BTCs.

a) Taux d'Humidité Optimal du Mélange

L'humidité du mélange joue un rôle déterminant dans la maniabilité, l'homogénéisation des composants et la qualité finale des BTCs. Les essais préliminaires ont permis de fixer une humidité optimale de 18 % par rapport au poids total des matériaux secs.

Ce taux a été retenu pour les avantages suivants:

- Faciliter le malaxage et l'homogénéisation des composants (latérite, sable, cendre de tourbe, poudre de coquillage et eau enrichie en *Bacillus subtilis*).
- Améliorer la plasticité du mélange, facilitant le moulage et la mise en forme des briques.
- Optimiser la densité et la cohésion interne des BTC après compactage, réduisant la formation de vides internes et les risques de fissuration lors du séchage.
- Renforcer l'adhésion entre les particules fines et grossières, garantissant une stabilité mécanique accrue après durcissement.

b) Pression de Compactage Appliquée

Le compactage est une étape essentielle qui conditionne la résistance et la durabilité des BTCs. Dans cette étude, une pression de 80kN a été appliquée à l'aide d'une presse Marshall et d'un moule Duriez (diamètre intérieur : 8 cm, hauteur : 15 cm).

L'application d'une pression élevée permet de:

- Augmenter la densité des briques, réduisant ainsi leur porosité et améliorant leur imperméabilité face aux agressions extérieures.
- Optimiser l'adhérence des particules, renforçant la cohésion du matériau et sa résistance mécanique finale.
- Améliorer la stabilité dimensionnelle des BTC après séchage, minimisant le retrait volumique et les fissurations.

c) Conditions de Durcissement et Temps de Stabilisation

Le durcissement des BTCs constitue une phase critique, influençant directement leur résistance mécanique et leur comportement à long terme.

Les briques sont entreposées dans un environnement contrôlé, à température ambiante, à l'abri du vent et du soleil, afin de prévenir les fissurations causées par un séchage trop rapide.

Deux périodes de stabilisation ont été définies pour suivre l'évolution des propriétés mécaniques :

- À 14 jours : cette première étape permet d'analyser la résistance initiale et d'identifier les formulations présentant un bon potentiel de stabilisation.
- À 28 jours : correspond au durcissement avancé des briques, offrant une résistance stabilisée et permettant de comparer les performances des formulations à maturité complète.

Le choix d'un taux d'humidité optimal de 18 %, d'une pression de compactage de 80 kN et d'un temps de stabilisation de 14 et 28 jours assure une mise en œuvre efficace des BTCs et un développement optimal de leurs propriétés mécaniques. Ces paramètres sont essentiels pour comparer l'efficacité des différentes formulations testées.

3.5 Confection des éprouvettes d'expérimentation

Une fois les proportions des matériaux définies, chaque formulation est élaborée selon un protocole rigoureux, garantissant une méthodologie méthodique et reproductible. Ce processus suit une succession d'étapes essentielles, visant à optimiser l'homogénéisation, la stabilité et les performances mécaniques des BTCs.

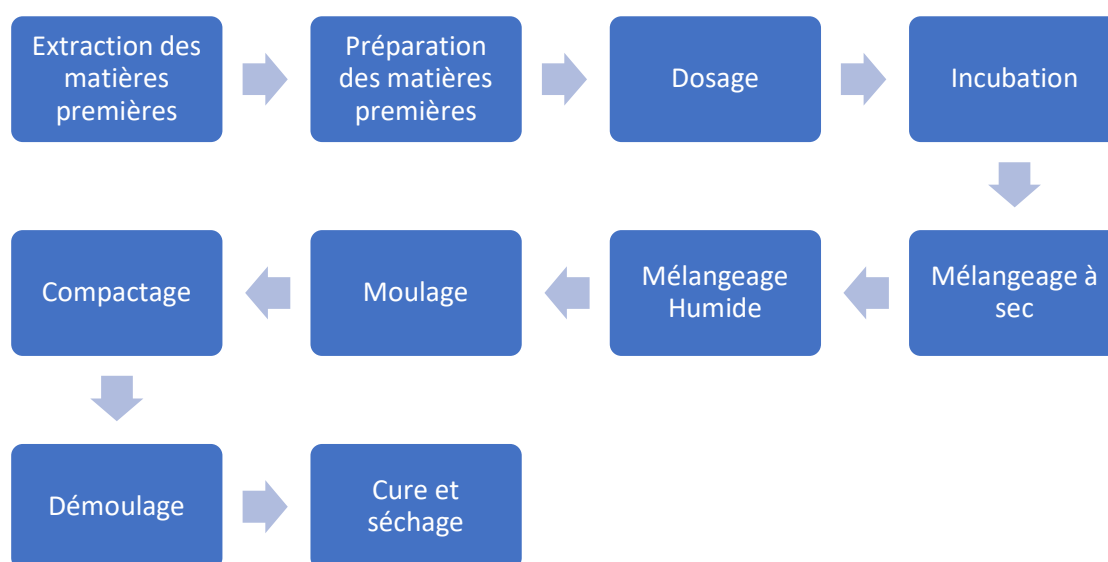


Figure 5: Processus de confection des éprouvettes

3.5.1 Confection

- Tamisage des matières premières : il permet d'assurer une granulométrie homogène et une répartition uniforme des composants :

- Latérite : tamisée à 0,4 mm pour garantir une granulométrie uniforme.
- Cendre de tourbe : tamisée à 0,2 mm afin d'optimiser sa répartition dans le mélange.
- Poudre de coquillages : tamisée à 0,4 mm pour faciliter son incorporation.

- Sable de classe 0/2: tamisé à 2 mm, limitant la rétraction et améliorant la compacité du mélange.
 - Incubation de la latérite avec la solution de *Bacillus subtilis* : l'intégration de la solution microbienne suit un protocole spécifique:
 - La latérite est mélangée avec la solution de *Bacillus subtilis*, dans une proportion de 18 % par rapport à la masse de latérite.
 - La préparation est incubée pendant 5 jours à température ambiante, afin de stimuler la croissance et l'activation des bactéries.
 - Pesée et dosage des matériaux : chaque composant est pesé avec précision afin de respecter les proportions définies et garantir la reproductibilité des formulations.
 - Mélange des composants secs : les matières premières sont homogénéisées à sec pendant 10 à 15 minutes, favorisant :
 - Une répartition uniforme des particules,
 - Une meilleure intégration des stabilisants naturels (cendre de tourbe, poudre de coquillages),
 - Une optimisation de la cohésion du mélange.
 - Ajout progressif de l'eau de gâchage : l'eau est incorporée progressivement afin d'atteindre une humidité optimale de 18 % :
- Pour les Échantillons E5, E6 et E7 : la solution de gâchage est enrichie en culture bactérienne de *Bacillus subtilis*, afin d'étudier son effet sur la biostabilisation des BTCs.

3.5.2 Dimensions des éprouvettes fabriquées

Pour chaque formulation, un total de 8 échantillons cylindriques sont fabriqués, respectant des dimensions standard de 8cm de diamètre, avec une hauteur variante entre 7,7 et 10 cm, selon la composition.

Il est à noter que pour les essais mécaniques (mesure de la résistance à la compression simple), nous avons utilisé des moules cylindriques d'élancement 1, de dimension 5*5cm.

Les masses et dimensions exactes des échantillons sont récapitulées dans le tableau suivant :

Tableau 4: Masses et dimensions des éprouvettes

Échantillon	Masse (g)	Masse (g)	Diamètre (cm)	Diamètre (cm)	Hauteur (cm)	Hauteur (cm)
T1	831	850	8	8	8,4	8,6
T2	848	872	8	8	8,4	8,8
E1	828	845	8	8	7,7	7,9
E2	773	816	8	8	7,8	8,8
E3	907,5	865	8	8	9,2	8,7
E4	878	890	8	8	9	9,1
E5	821,5	793.5	8	8	9,2	8.65
E6	898,5	972.5	8	8	9,3	10



Figure 6 : éprouvettes d'expérimentation, cylindrique

4. Résultats

4.1 Propriétés physiques des BTCs

Les propriétés physiques des BTCs jouent un rôle majeur dans leur résistance et leur durabilité.

4.1.1 Densité humide et sèche

Les densités obtenues permettent d'évaluer la qualité du compactage et de mesurer l'effet des stabilisants sur la structure des BTCs.

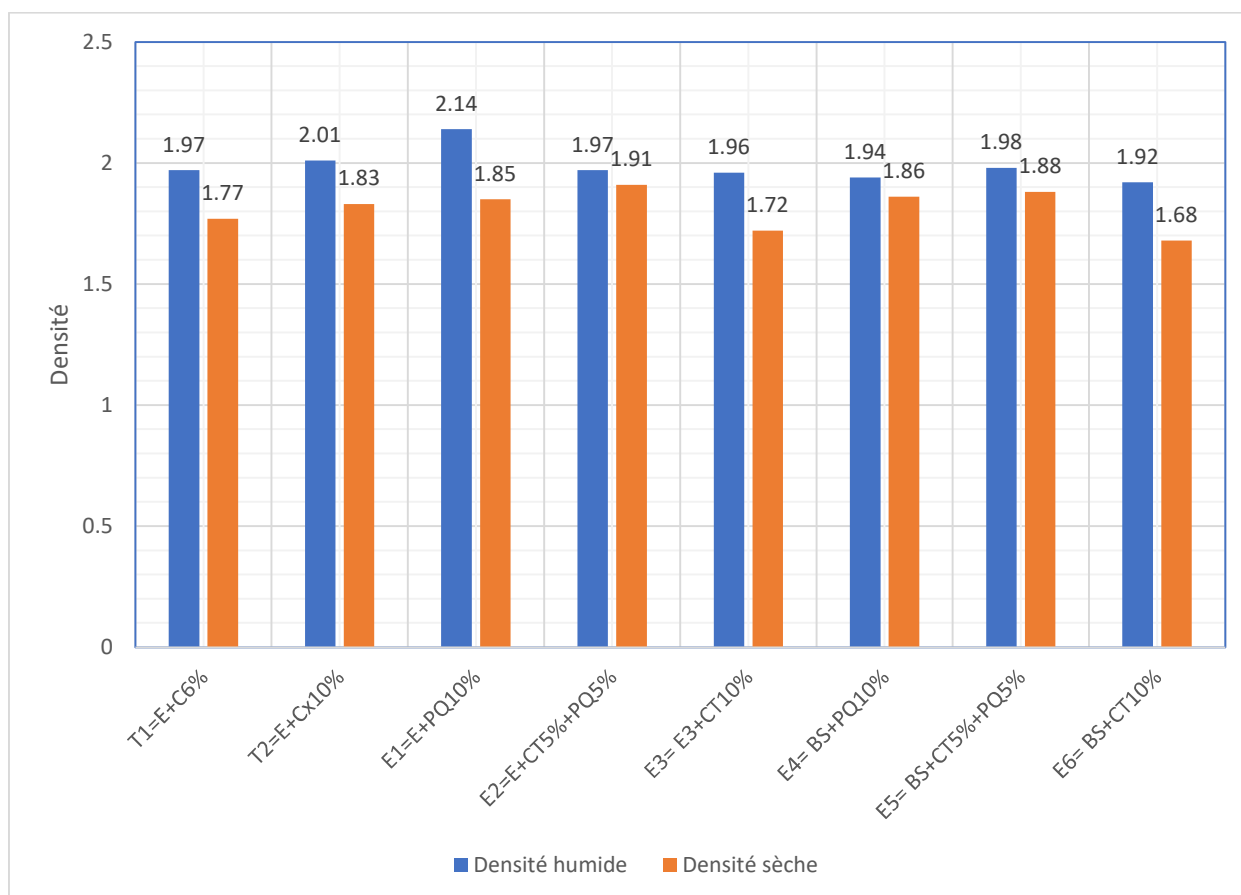


Figure 7 : Variation des densités humides et sèches en fonction de la variation des % en stabilisants et la nature des eaux de gâchage

- Les densités sèches des BTCs stabilisés varient entre 1,68 g/cm³ (E6) et 1,91 g/cm³ (E2), révélant des différences notables dans la compacité des formulations.
- L'échantillon Témoin T1 affiche la densité la plus élevée, traduisant une cohésion interne renforcée.
- À l'inverse, E6 présente la densité la plus faible, suggérant une porosité plus marquée et une sensibilité potentielle à l'eau.

4.1.2 Porosité des BTCs

La porosité influence la résistance des BTCs ainsi que leur comportement face à l'eau et aux contraintes mécaniques.

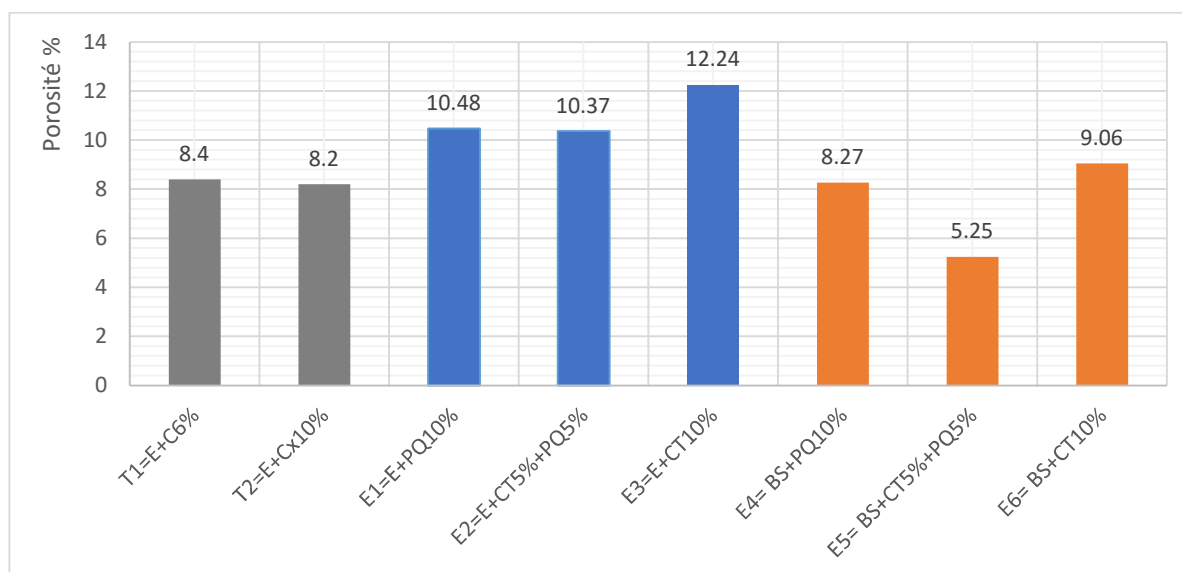


Figure 8 : Variation des porosités en fonction de la variation des % en stabilisants et la nature des eaux de gâchage

- E1, E2 et E3 affichent des porosités élevées (> 10 %), ce qui pourrait compromettre leur résistance mécanique et impacter leur durabilité.
- Utilisée seule en E3, la poudre de tourbe donne des résultats moins satisfaisants du point de vue porosité, quel que soit la nature de l'eau de gâchage.
- E5, stabilisée avec de la cendre de poudre de coquillage et de la solution de Bacillus Subtilis se distingue par une porosité très faible (5,25%), donnant une grande compacité et une résistance accrue à l'eau. Cette porosité modérée est probablement liée à la précipitation du carbonate de calcium qui colmate les pores, améliorant ainsi sa structure interne.

4.1.3 Absorption d'eau

L'absorption d'eau est un paramètre clé pour juger de la résistance des BTC à l'humidité et au vieillissement.

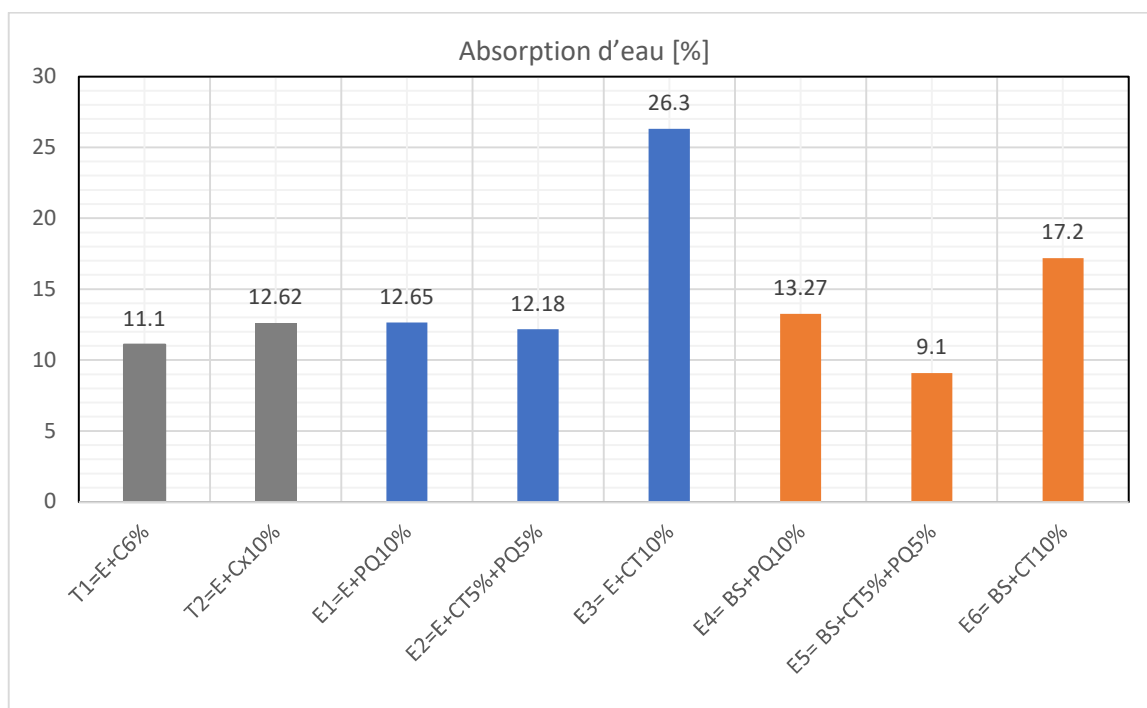


Figure 9: Variation de l'absorption d'eau des éprouvettes en fonction des compositions des mélanges

- E1 à E4 se situent dans une zone intermédiaire, avec des performances acceptables mais à surveiller selon l'usage prévu,
- Pareillement, la cendre de tourbe utilisée seule ne donne pas de résultats significatifs en E3,
- Seul E5 présente une absorption inférieure à 5 %, seuil généralement admis pour une bonne tenue hydrique,
- E6 dépasse largement les seuils critiques, indiquant une porosité excessive et une faible résistance à l'humidité.

4.2 Résistances mécaniques des BTCs

Les BTC doivent être suffisamment résistantes pour supporter des charges mécaniques sans se dégrader rapidement.

Les résultats des résistances à la compression obtenus à 14 jours, 28 jours et après immersion permettent d'évaluer la performance des BTCs en conditions normales et en milieu humide.

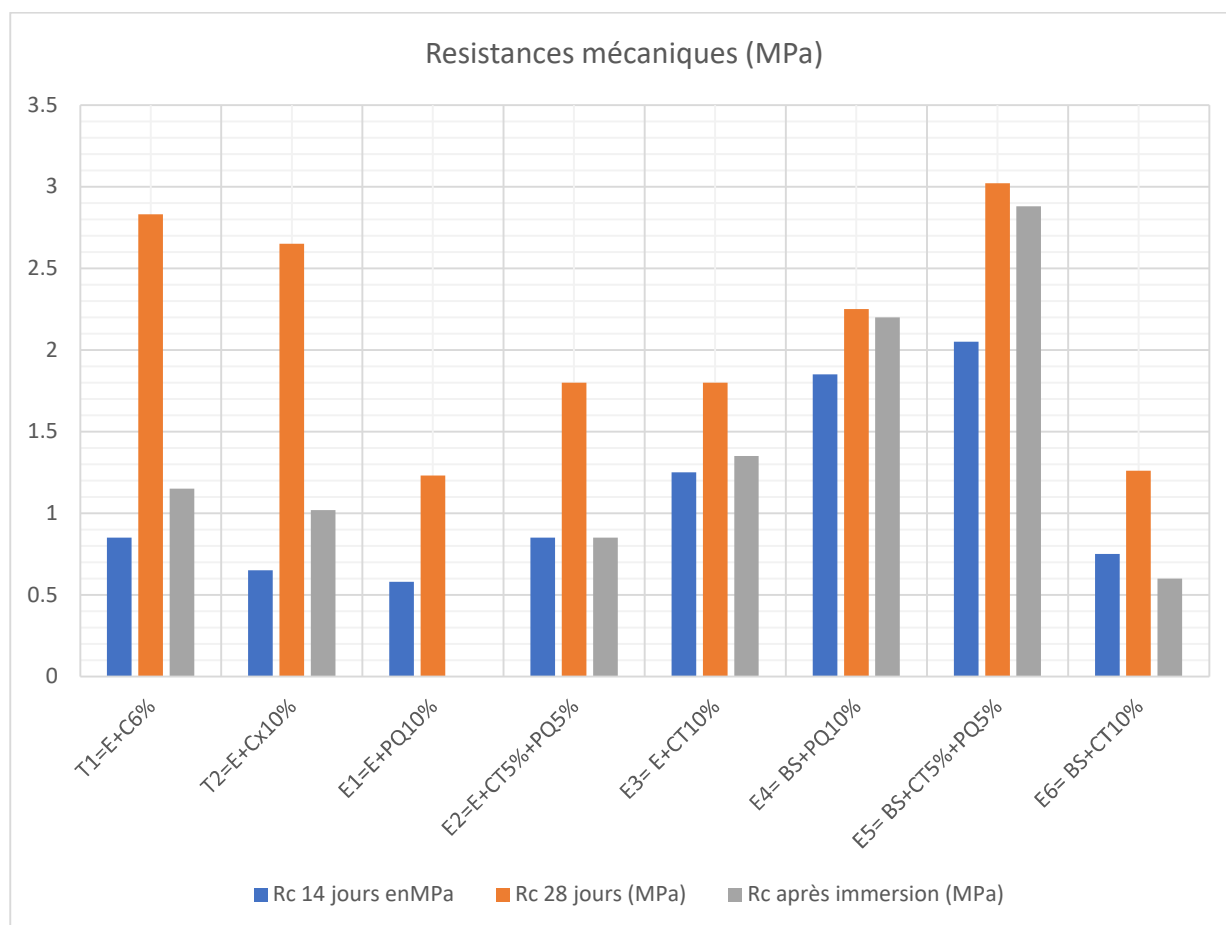


Figure 10: Variation des résistances mécaniques en fonction des compositions des mélanges

- Les témoins T1 et T2 offrent une bonne référence à sec, mais restent moins fiables en conditions saturées.
- Les formulations E4 et E5 se démarquent par leur résistance élevée et leur stabilité en milieu humide, confirmant l'efficacité des stabilisants (cendre de tourbe et poudre de coquillage avec biostabilisation).
- Les autres échantillons nécessitent des ajustements pour améliorer leur tenue mécanique et leur durabilité.

4.3 Durabilité et propriétés hygroscopiques

Afin de compléter l'analyse des performances physiques et mécaniques des BTC biostabilisées, une étude approfondie de leur durabilité face aux cycles humidité-séchage ainsi que de leurs propriétés hygroscopiques a été menée. Les résultats ci-après permettent de montrer le comportement des différentes formulations dans des conditions climatiques variables et d'évaluer leur aptitude à assurer une stabilité dimensionnelle et structurelle à long terme.

Tableau 5 : Durabilité (cycle humidité – séchage)

Échantillon	Rc initial (MPa)	Rc après 10 cycles	Perte (%)	État visuel
E1	1,23	0,85	30,89	Fissures modérées
E2	1,8	1,35	25	Bonne tenue mais avec écaillage visible
E3	1,8			Désagrégation
E4	2,25	1,63	27,56	Bonne tenue mais avec écaillage visible
E5	3,02	2,06	31,79	Très bonne tenue
E6	1,26	0,95	24,6	Fissures légères

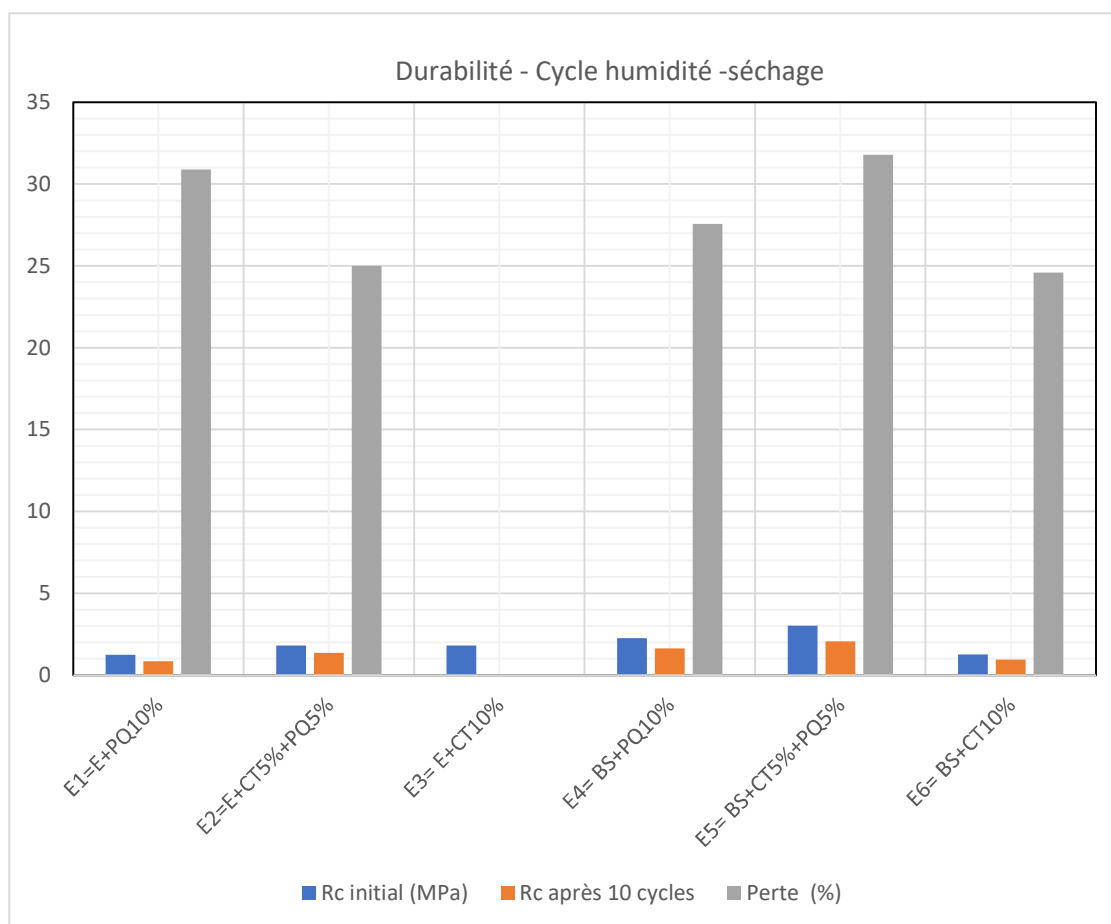


Figure 11: Variation de la durabilité en fonction des compositions du mélange

- L'échantillon E3 présente une faible durabilité, se désagréant au cours des essais, ce qui montre l'inefficacité de la cendre de tourbe utilisée seule comme stabilisant.
- E1 et E6 montrent des fissurations modérées. Elles présentent une durabilité correcte, adaptée à des milieux peu exposés.
- Les échantillons E2 et E4 offrent les meilleures performances intermédiaires, avec une résistance résiduelle élevée (>2 MPa) et une faible perte, traduisant une excellente cohésion interne. Toutefois, des écaillages sont visibles à la surface, révélant une sensibilité persistante à l'eau.

- E1, E2 et E4 présentent une tenue moyenne, avec des fissures et une vulnérabilité aux cycles hydriques.
- Enfin, E5 se distingue comme l'échantillon le plus performant, combinant une résistance initiale élevée (3,02 MPa), une faible perte après 10 cycles ($\approx 31,8\%$), et une bonne tenue à l'eau. Sa formulation intégrant *Bacillus subtilis*, la cendre de tourbe et la poudre de coquillages assure une biocimentation efficace et une cohésion durable, même en conditions humides.

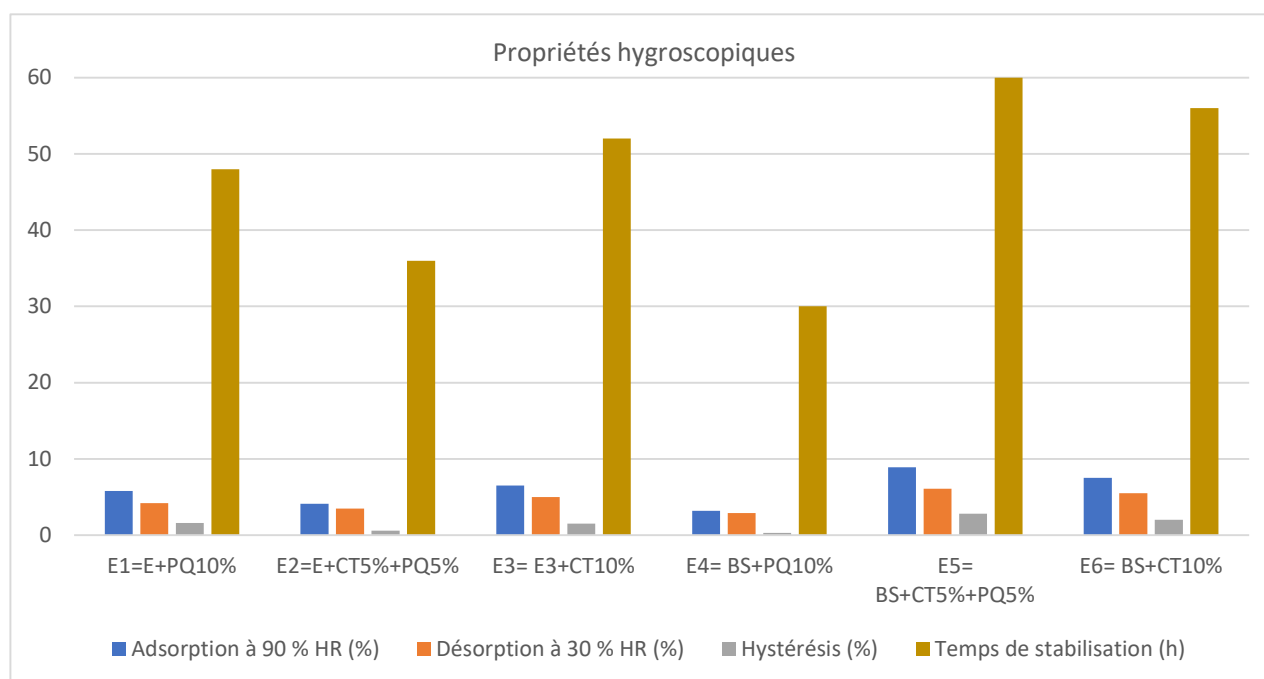


Figure 12: Variation des comportements hygroscopiques en fonction des compositions du mélange

[HR] : humidité relative

Les essais hygroscopiques montrent que :

- E1 reste une solution intermédiaire, mais moins optimisée que les formulations biostabilisées.
- E2 combine rapidité de stabilisation et faible hystérésis, ce qui le rend adapté aux chantiers à mise en œuvre rapide.
- **E4, E6 et E3** doivent être utilisés avec précaution dans des environnements exposés, en raison de leur sensibilité à l'humidité.
- **E5** est le plus performant en régulation hygroscopique, idéal pour des applications en zones humides ou à forte variation climatique.

5. Discussions

5.1 Sur l'influence des différentes matières stabilisantes

- Cendre de tourbe (CT) : La cendre de tourbe, utilisée dans E2, E3, E5 et E6, agit comme un liant pouzzolanique. Elle améliore la résistance mécanique (notamment dans E3), mais augmente la porosité si mal dosée, comme observé dans E4 et E6. Son efficacité dépend donc du taux d'incorporation et de la qualité du compactage.

- Poudre de coquillage (PQ) : la poudre de coquillage, riche en carbonate de calcium, favorise la précipitation de calcite et la réduction de la porosité. E5, qui en contient 9 %, montre les meilleurs résultats en absorption, résistance et stabilité hygroscopique. Elle agit comme un agent de colmatage et de durcissement.
- Solution bactérienne (*Bacillus subtilis*) : La biostabilisation par *Bacillus subtilis* (E4 à E6) améliore la cohésion interne par biocimentation. Elle est particulièrement efficace en présence de PQ (E5), mais moins performante avec CT seule (E4, E6), suggérant une synergie nécessaire entre les stabilisants.

5.2 Analyse des performances des BTCs stabilisées par rapport aux exigences normatives

Les performances des briques de terre comprimée (BTCs) stabilisées ont été évaluées selon plusieurs critères techniques : résistance mécanique, absorption d'eau, durabilité et comportement hygroscopique. Ces critères sont confrontés aux exigences normatives généralement admises pour les matériaux de construction en terre.

- Résistance mécanique : selon les normes de référence (CRATerre, ASTM D1633, normes locales), une BTC destinée à un usage structurel doit atteindre une résistance à la compression minimale de 2 MPa à 28 jours. Seuls les échantillons E5 (3 MPa) et E4 (2,25 MPa) satisfont pleinement cette exigence. Les autres formulations (E1, E2, E4, E6) restent en dessous du seuil, avec des performances allant de 1,07 à 1,80 MPa, les rendant plus adaptées à des usages non porteurs ou secondaires.
- Absorption d'eau : les normes recommandent une absorption maximale de 5 % pour garantir une bonne tenue en milieu humide. Seul E5 respecte ce seuil (2,18 %), tandis que E4 et E6 présentent des valeurs critiques (>21 %), compromettant leur durabilité. Les échantillons E1 à E3 affichent une absorption intermédiaire (11–13 %), acceptable dans des contextes tempérés mais insuffisante pour des zones tropicales humides.
- Sur l'ensemble des formulations testées :
 - E4 et E5 sont les seuls à répondre aux exigences normatives en matière de durabilité et E5 en matière de résistance.
 - E5, en particulier, combine une faible absorption, une bonne résistance après immersion, et une stabilité hygroscopique remarquable, ce qui en fait un candidat conforme pour des applications en parois porteuses et exposées.
 - Les autres formulations nécessitent des ajustements : soit par optimisation des dosages, soit par amélioration du compactage ou de la cure.
 - Les témoins T1 et T2, bien qu'atteignant des résistances élevées à sec (>2,6 MPa), montrent une tenue hydrique inférieure à celle des formulations stabilisées, confirmant l'intérêt des ajouts spécifiques.

5.3 Sur la durabilité et propriétés hygroscopiques

- Les essais simulés de cycles humidité-séchage montrent que E4 et E5 conservent leur résistance (>2 MPa) avec une perte de masse <3 %, traduisant une excellente tenue aux agressions climatiques. E2 reste stable, tandis que E1, E4 et E6 présentent des fissures et une dégradation mécanique notable.
- La régulation de l'humidité ambiante est essentielle pour le confort thermique et la stabilité dimensionnelle. E5 et E2 présentent une hygroscopicité faible et un temps de stabilisation rapide (<36 h), favorables à un usage en parois respirantes. E4 et E6, en revanche, montrent une forte sensibilité à l'humidité (adsorption >7.5 %, hystérésis >2 %), les rendant instables en climat humide.

Les résultats confirment que la combinaison poudre de coquillage + biostabilisation bactérienne (E5) est la plus efficace pour produire des BTCs conformes aux normes de construction en terre. La cendre de tourbe offre un bon potentiel mécanique, mais nécessite un dosage précis. Les formulations mal équilibrées ou trop poreuses doivent être optimisées pour garantir leur durabilité et leur stabilité hydrique.

Conclusion

Cette étude a mis en lumière l'efficacité de la biostabilisation dans l'amélioration des briques de terre comprimée (BTC), en intégrant des matières premières locales et des stabilisants innovants. Les résultats obtenus confirment que la biominéralisation induite par *Bacillus subtilis* favorise la précipitation de carbonate de calcium au sein de la matrice terreuse, réduisant les vides internes et augmentant la compacité des BTCs. Cette approche permet non seulement d'améliorer les performances mécaniques et hydriques des briques, mais aussi de valoriser des ressources locales telles que la latérite, la paille de riz, la cendre de tourbe et la poudre de coquillages, tout en réduisant les coûts et l'empreinte écologique par rapport aux liants conventionnels. Cette approche, appliquée notamment à l'échantillon E5, a permis d'atteindre une absorption d'eau très faible (9,1 %), une résistance à la compression après immersion de 3,02 MPa, et une hystérésis hygroscopique minimale (0,3 %), traduisant une excellente stabilité dimensionnelle.

L'utilisation de ressources locales telles que la latérite, la cendre de tourbe et la poudre de coquillage a permis de limiter les coûts et l'impact environnemental.

Pour prolonger cette recherche, plusieurs perspectives sont envisageables. L'optimisation des paramètres biologiques, notamment la concentration de *Bacillus subtilis* et les conditions de culture, pourrait renforcer la biominéralisation. L'exploration de synergies avec d'autres bactéries précipitantes de carbonate de calcium constitue également une piste prometteuse.

La diversification des matières premières locales représente un autre axe stratégique. L'intégration de déchets agro-industriels tels que les fibres végétales ou les cendres volantes pourrait améliorer la durabilité tout en réduisant les coûts. Des formulations enrichies en silice et en alumine pourraient également renforcer la cohésion interne.

L'application à grande échelle nécessitera des essais sur des BTCs de dimensions standard, afin de valider les performances en conditions réelles. Il sera également essentiel d'évaluer l'adaptabilité des formulations aux variations climatiques et géotechniques régionales.

Enfin, une analyse environnementale et économique comparative permettra de quantifier les gains en termes d'empreinte carbone et de coûts par rapport aux méthodes conventionnelles. Ces éléments seront déterminants pour promouvoir l'adoption de la biostabilisation auprès des acteurs du bâtiment et des décideurs publics.

Références

- [1]. Achal, V., Mukherjee, A., Basu, P. C., & Reddy, M. S. (2009). Strain improvement of *Sporosarcina pasteurii* for enhanced urease and calcite production. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 36(7), 981–988. (Référence sur la biominéralisation bactérienne appliquée aux matériaux de construction)
- [2]. Benahmed, N. (2020). Stabilisation de matériaux de construction durables et écologiques à base de terre crue. Thèse de doctorat, Université de Toulouse. Accès au texte intégral
- [3]. Miraucourt, D. (2020). Stabilisation du matériau terre crue pour application en brique de terre comprimée au Burkina Faso. Mémoire de fin d'études, Université de Liège.
- [4]. Ouedraogo, A. (2018). Étude des briques en terre comprimée stabilisées à la chaux des carrières de Dori. Institut 2iE, Burkina Faso.
- [5]. Rakotondramanana, H., & Andriamamonjy, A. (2020). Étude expérimentale sur les blocs de terre comprimée stabilisés à la chaux et à la cendre de riz. Recherche sur l'amélioration des BTC à partir de matériaux locaux malgaches, avec analyse du confort thermique et de la résistance à l'eau. Lire l'article. *IJPSAT – International Journal of Progressive Sciences and Technologies*, vol. 22(2), pp. 45–52.

-
- [6]. Ramanantsoa, T. A. (2019). Valorisation des déchets agro-industriels dans la fabrication de matériaux de construction à base de terre. Application des cendres de bagasse et des fibres végétales dans les BTC, avec essais de durabilité et d'absorption. Mémoire de Master, Université d'Antananarivo, École Supérieure Polytechnique.
- [7]. Rasolofomanana, J. A. (2021). Formulation et modélisations mathématiques des briques de terre comprimées à base de latérite et de liants locaux. Étude sur l'optimisation des formulations BTC à Madagascar, avec modélisation des propriétés mécaniques selon les dosages en liants naturels. *Revue Mada-Hary*, vol. 11.
- [8]. Vissac, A., & Houben, H. (2006). Construire en terre. CRATerre, Éditions Belin. (Ouvrage de référence sur les techniques de construction en terre et les critères normatifs)
- [9]. Walker, P., Heath, A., & Lawrence, M. (2012). Modern earth building: materials, engineering, construction and applications. Woodhead Publishing. (Analyse des performances mécaniques et hygrothermiques des BTC modernes)