



Formulation et caractérisation mécanique d'un éco-géo-matériau à base des graveleux latéritiques intégrant des fibres de molinie bleue pour la durabilité des constructions en blocs de terre comprimée (BTC) au Togo

**Israël MAMAH¹, Higinio Menendez MILANES², Mohamed Abdallah Naguib EL-REEDY³
Abbas Abbaszadeh SHAHRI⁴**

¹ Docteur Ph.D., Consultant en Bureau d'études géotechniques, Tropical Engineering Consult (TrEC), 13 BP 556, Lomé-Togo

² Professeur Titulaire, Alfonso X El Sabio University, Département de génie civil, 1, C.P. 28691, Madrid-Espagne

^{3,4} Maître de Conférences, Bircham International University, Département de génie civil, 2, C.P. 28691, Madrid-Espagne

Résumé

Cette étude a pour objectif l'amélioration des performances mécaniques des BTC. Pour ce faire, la formulation d'un éco-géo-matériau combinant des graveleux latéritiques et des fibres naturelles de molinie bleue (*Molinia caerulea* moorhexe) est mise au point. Une première phase des travaux portait sur l'analyse des matériaux pour la validation des propriétés géotechniques des graveleux latéritiques de Sara et de Kawa à travers des essais d'identification. Une seconde phase était celle de l'intégration des fibres dans des proportions variant entre 0,5 % et 2,5 % avec une longueur standard de 5 cm et des tests de résistance mécanique à 28 jours d'âge à l'aide de la presse hydraulique à béton. Une comparaison avec des BTC non renforcés a suivi via l'analyse des résultats des essais mécaniques a révélé que les BTC améliorés avec 0,5 % de fibres optimisent la résistance à la compression, à la traction, au cisaillement et à la flexion, garantissant une meilleure durabilité des structures. Comparés aux BTC classiques, ces nouveaux blocs fibrés offrent une résistance et une stabilité accrues face aux variations climatiques, tout en étant moins polluants et plus économiques.

Mots-clés: formulation, amélioration, performance mécanique, éco-géo-matériau, BTC.

Formulation and mechanical characterization of an eco-geo-material based on lateritic gravels integrating blue molinia fibers for the durability of compressed earth blocks (CEB) constructions in Togo

Abstract

This study aims to improve the mechanical performance of compressed earth blocks (CEB). To achieve this, the formulation of an eco-geocomposite material combining lateritic gravel and natural fibers from blue molinia (*Molinia caerulea* moorhexe) is developed. The first phase of the work focused on the analysis of materials to validate the geotechnical properties of the lateritic gravels from Sara and Kawa through identification tests. The second phase involved integrating the fibers in proportions ranging from 0.5% to 2.5% with a standard length of 5 cm, and mechanical resistance tests at 28 days of age using the concrete hydraulic press. A comparison with unreinforced CEB followed, and the analysis of the results from the mechanical tests revealed that CEB enhanced with 0.5% fibers optimize resistance to compression, tension, shear, and bending, ensuring better durability of the structures. Compared to traditional CEB, these new fiber-reinforced blocks offer increased resistance and stability against climatic variations, while being less polluting and more economical.

Keywords: formulation, improvement, mechanical performance, eco-geo-material, CEB.

Digital Object Identifier (DOI): <https://doi.org/10.5281/zenodo.16779650>

1. Introduction

La terre est un matériau ancestral pour la construction d'habitations [1]. A l'échelle du continent africain où la population ne cesse de croître, trouver une habitation durable et surtout à un coût abordable, devient de plus en plus difficile [2]. Or, en zone périurbaine les matériaux en terre s'avèrent aussi inadaptés pour les constructions en BTC au format moderne, du fait de leurs faibles performances mécaniques [3, 4]. Cela conduit à l'utilisation massive de matériaux cimentaires qui présentent également des inconvénients importants tels que le coût énergétique pour la production du ciment, la pollution induite, l'inconfort thermique des maisons en parpaings de ciment dans les zones sub-sahariennes, etc. [3, 5]. A cet effet, il devient crucial à travers notre étude, de développer un éco-géo-matériau, bas carbone à base des matières premières minérales (sols latéritiques) [2, 4] et des matières premières végétales (fibres de molinie bleue) [5] afin d'améliorer les propriétés mécaniques des BTC, notamment leurs résistances aux sollicitations dans les constructions [2, 3, 5].

2. Matériel et méthodes

2-1. Matériel

Le matériel utilisé pour la formulation et les essais mécaniques des BTC est composé du moule brésilien normalisé de volume $V=1570 \text{ cm}^3$, une dame pesant 4536kg, des papiers filtres, un jeu de tamis de la série AFNOR, de mailles 0,08 mm, 0,125 mm, 0,25 mm, 0,5 mm, 1 mm, 2 mm, 4 mm, 5 mm et 20 mm, une balance électronique, des bacs d'homogénéisation, une éprouvette, la presse hydraulique à béton, la machine de traction et autres accessoires. Des échantillons de graveleux latéritiques sont prélevés dans deux (2) carrières d'extraction dans la zone nord du Togo plus précisément à Sara et à Kawa dans la région de la Kara, répartis à raison de cinq échantillons par carrière; soit un total de 10 échantillons. Les **Figures 1, 2 et 3** illustrent respectivement la carte géographique du Togo indiquant la localisation de la zone d'étude, les cinq puits de prélèvement d'échantillon de sol à la carrière de Sara et les cinq puits de prélèvement d'échantillon de sol à la carrière de Kawa [5].

Les graveleux latéritiques prélevés sont séchés dans une étuve à une température de 105°C pendant 20h. Les échantillons secs sont d'abord soumis aux essais d'identification suivants: l'essai de teneur pondérale en matières organiques [6], l'essai d'analyse granulométrique [7, 8], l'essai de limites d'Atterberg [9], l'essai au bleu de méthylène [10, 11] et l'essai Proctor qui consistait à réduire leur sensibilité à l'eau [12]. L'essai de traction a été réalisé sur la fibre de molinie bleue de diamètre $\varnothing = 3 \text{ mm}$, de longueur initiale $L_0 = 280 \text{ mm}$ et a consisté à placer la fibre à étudier entre deux mâchoires d'une machine de traction qui tire sur la fibre jusqu'à rupture. On enregistre sur l'écran l'allongement total $L = 320 \text{ mm}$ d'où la déformation est égale à 14,29 % avec une force appliquée de 3,25 KN pour une contrainte de rupture de la fibre calculée égale à 5,25 MPa [5].

Ensuite, la formulation, la fabrication de l'éco-géo-matériau et les tests de résistance mécanique à savoir les essais de résistance à la compression, à la traction, au cisaillement et à la flexion ont été réalisés sur les BTC [5].

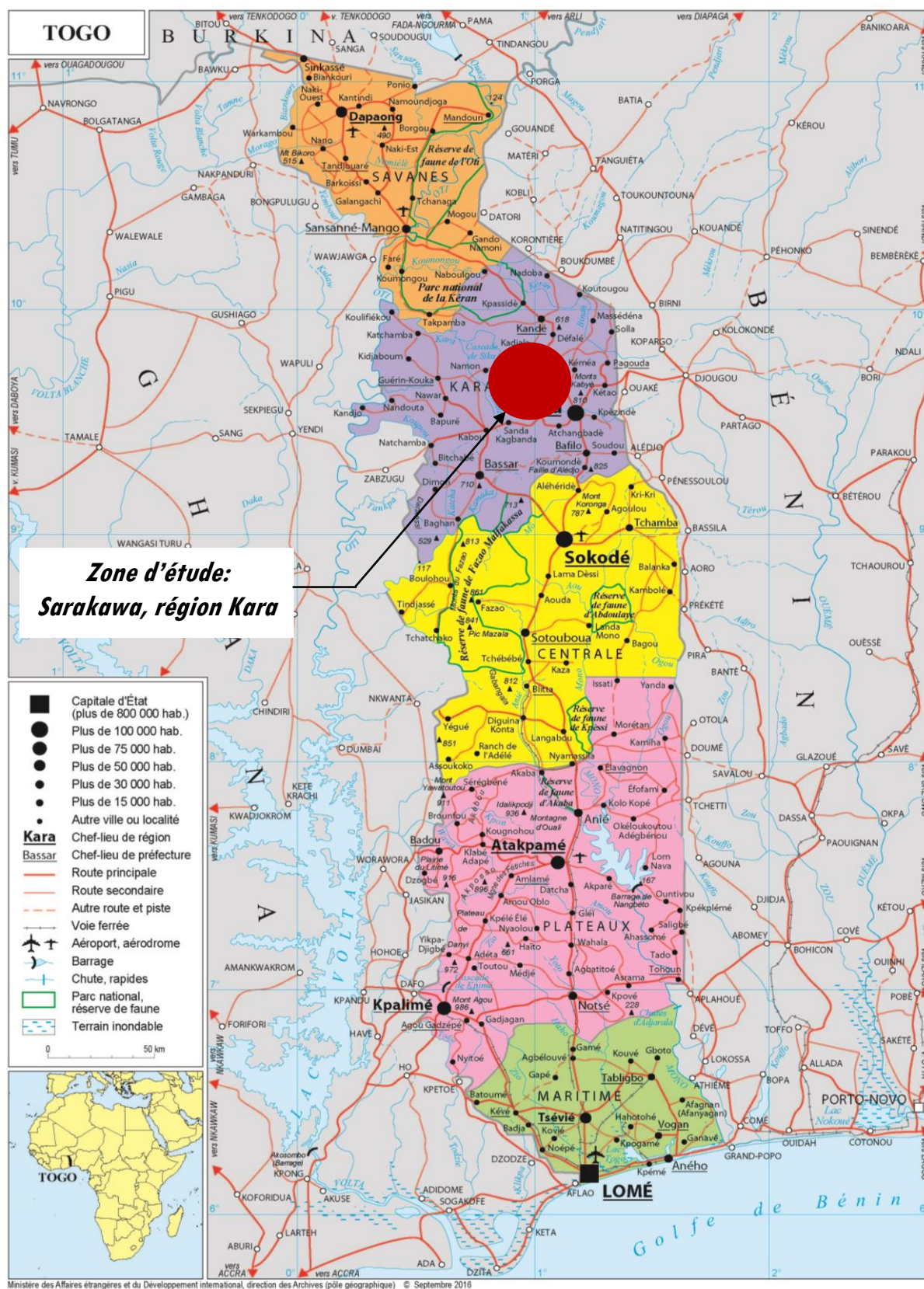


Figure 1: Carte géographique du Togo indiquant la localisation de la zone d'étude

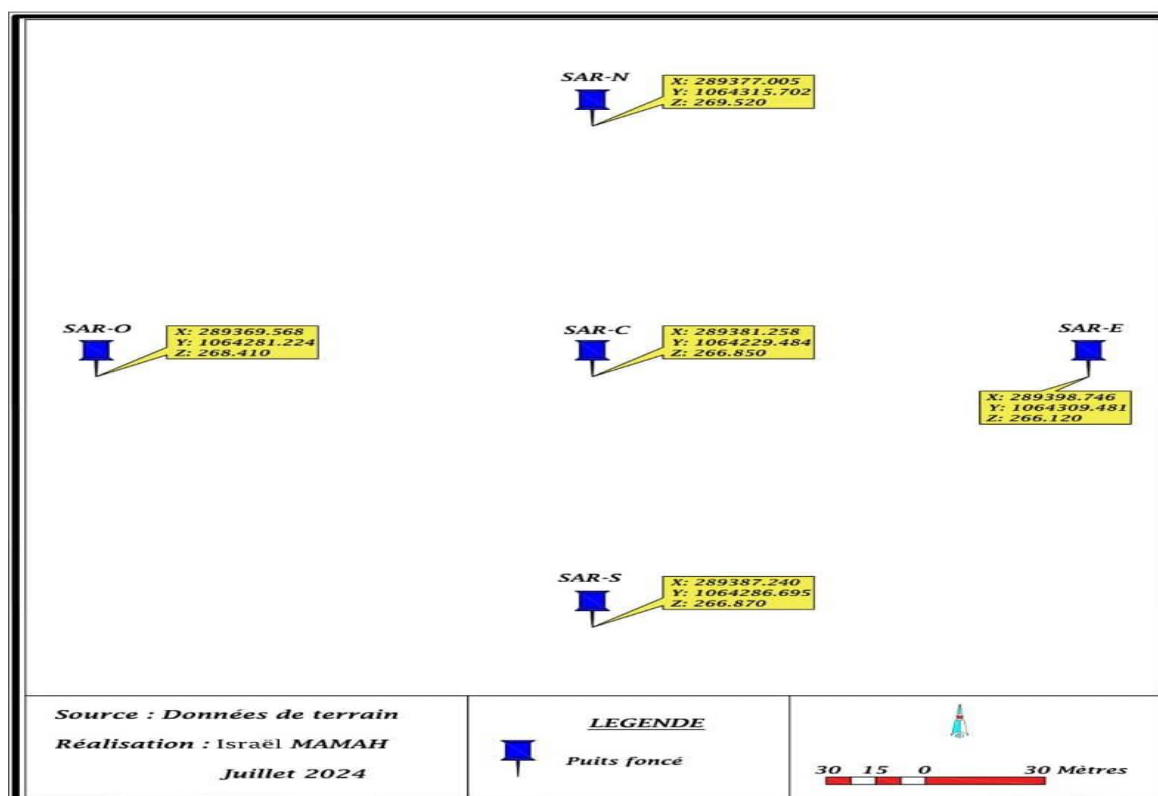


Figure 2: Cinq puits de prélèvement d'échantillon de sol à la carrière de Sara

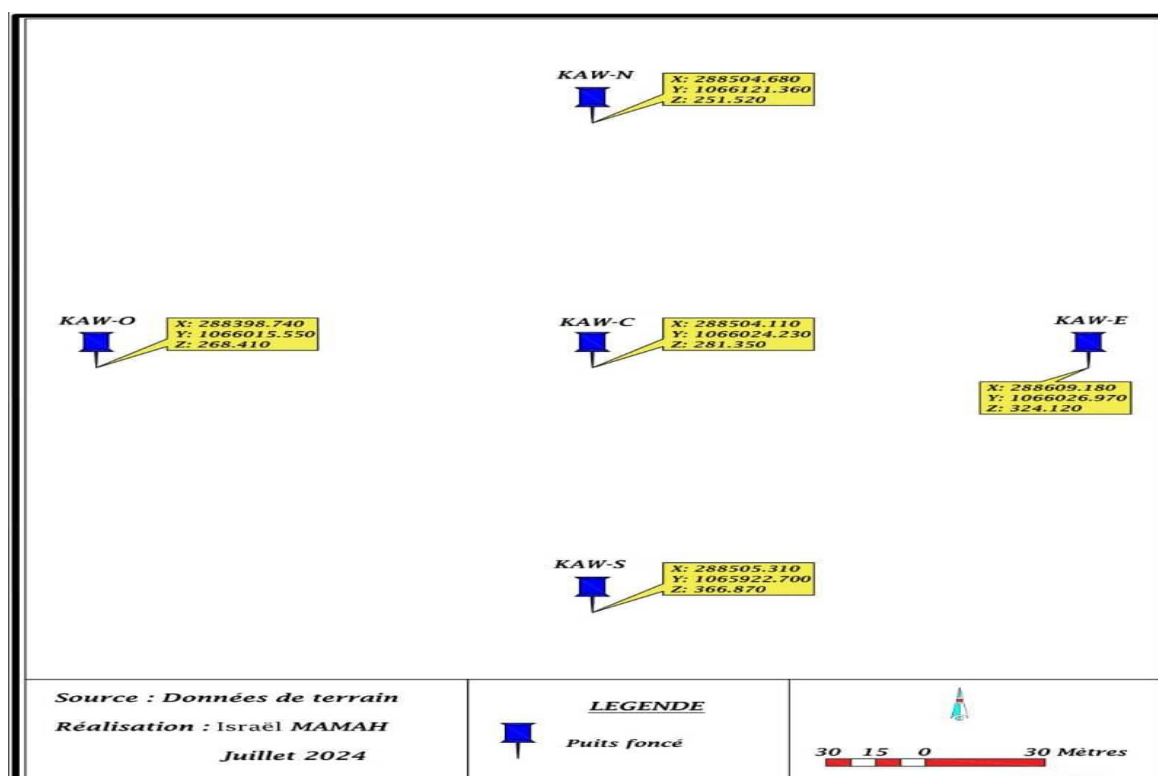


Figure 3: Cinq puits de prélèvement d'échantillon de sol à la carrière de Kawa

2-2. Méthodes

2-2-1. Hypothèse de formulation des mélanges de l'éco-géo-matériau

Pour la formulation, notons qu'à défaut de la disponibilité du matériel adéquat dans nos laboratoires locaux pour la fabrication des blocs de terre comprimée exactement comme celui utilisé dans les usines de fabrication des BTC, nous nous trouvâmes dans l'obligation de faire recours dans un premier temps à l'usage du moule Brésilien normalisé de volume $V = 1570 \text{ cm}^3$ comme éprouvette de fabrication des blocs de terre comprimée. Dans un second temps, en considérant la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale des essais Proctor modifié préalablement réalisés pour chaque dosage en fibres brutes des différents matériaux minéraux basiques ainsi que la contrainte de compactage dynamique optimale pour la formulation de l'éco-géo-matériau. Cependant, gardant à l'esprit que l'objectif poursuivit au cours de cette étude n'est pas forcément de fabriquer des modèles de BTC typiquement comme ce qui se fait couramment en usine mais de trouver une ou des formulations des mélanges de matériaux en graveleux latéritiques améliorés aux fibres de molinie bleue ayant une bonne résistance à la traction afin d'accroître les résistances mécaniques en vue de garantir la pérennité des constructions en BTC [5].

2-2-1-1. Codification des mélanges retenus à l'optimum Proctor modifié pour la formulation de l'éco-géo-matériau

Le système de codification retenu est composé d'un groupe de lettres majuscules dont la première désigne le bloc et la deuxième, troisième et/ou quatrième lettre désigne chaque constituant du mélange et la provenance de la matière première de base; les chiffres quant à eux représentent le taux et dimension de chaque constituant dans le mélange [2]. A titre d'exemple, $BKF_{0,5}^5 E_{15,2}$ désigne un bloc de terre comprimée à base des graveleux latéritiques de Kawa renforcé par 0,5 % de fibres de longueur 5cm et dosé à 15,2 % d'eau comme le désigne le **tableau 1** [5].

Tableau 1: Tableau de codification des mélanges pour la formulation de l'éco-géo-matériau

Code	Désignation
$B_0SE_{13,5}$	Bloc de terre comprimée à base des graveleux latéritiques de Sara sans aucun ajout à 13,5 % d'eau
$B_0KE_{11,8}$	Bloc de terre comprimée à base des graveleux latéritiques de Kawa sans aucun ajout à 11,8 % d'eau
$BSF_{0,5}^5 E_{14,7}$	Bloc de terre comprimée à base des graveleux latéritiques de Sara renforcé par 0,5 % de fibres de longueur 5cm et dosé à 14,7 % d'eau
$BKF_{0,5}^5 E_{15,2}$	Bloc de terre comprimée à base des graveleux latéritiques de Kawa renforcé par 0,5 % de fibres de longueur 5cm et dosé à 15,2 % d'eau
$BSF_1^5 E_{14,0}$	Bloc de terre comprimée à base des graveleux latéritiques de Sara renforcé par 1 % de fibres de longueur 5cm et dosé à 14,0 % d'eau
$BKF_1^5 E_{14,7}$	Bloc de terre comprimée à base des graveleux latéritiques de Kawa renforcé par 1 % de fibres de longueur 5cm et dosé à 14,7 % d'eau
$BSF_{1,5}^5 E_{13,7}$	Bloc de terre comprimé à base des graveleux latéritiques de Sara renforcé par 1,5 % de fibres de longueur 5cm et dosé à 13,7 % d'eau
$BKF_{1,5}^5 E_{13,3}$	Bloc de terre comprimée à base des graveleux latéritiques de Kawa renforcé par 1,5 % de fibres de longueur 5cm et dosé à 13,3 % d'eau
$BSF_2^5 E_{14,8}$	Bloc de terre comprimée à base des graveleux latéritiques de Sara renforcé par 2 % de fibres de longueur 5cm et dosé à 14,8 % d'eau
$BKF_2^5 E_{15,0}$	Bloc de terre comprimée à base des graveleux latéritiques de Kawa renforcé par 2 % de fibres de longueur 5cm et dosé à 15,0 % d'eau
$BSF_{2,5}^5 E_{13,9}$	Bloc de terre comprimée à base des graveleux latéritiques de Sara renforcé par 2,5 % de fibres de longueur 5cm et dosé à 13,9 % d'eau
$BKF_{2,5}^5 E_{13,5}$	Bloc de terre comprimée à base des graveleux latéritiques de Kawa renforcé par 2,5 % de fibres de longueur 5cm et dosé à 13,5 % d'eau

2-2-1-2. Principe de formulation

L'opération de formulation des mélanges consiste à confectionner des éprouvettes cylindriques à l'aide du moule Brésilien de diamètre $\varnothing = 100 \text{ mm}$, de hauteur $h = 200 \text{ mm}$ donc de volume $V = 1570 \text{ cm}^3$ aux dosages selon le référentiel des résultats à l'optimum des essais Proctor modifié obtenus précédemment lors de la pré formulation pour les deux géo-matériaux à 0 % de fibres ainsi que les cinq dosages de fibres de molinie bleue à 0,5 %, 1 %, 1,5 %, 2 % et 2,5 %.

1,5 %, 2 % et 2,5 %, aux teneurs en eau optimales respectives avec chacun des deux matériaux de base Sara et Kawa. Une fois les éprouvettes confectionnées, elles seront conservées dans une chambre climatique pour une durée de 28 jours en vue de les soumettre après durcissement aux essais de résistance vis-à-vis des différentes sollicitations. L'objectif serait de déterminer les valeurs de la résistance des BTC aux efforts de compression, de traction et de flexion aux dosages en fibres de l'éco-géo-matériau à 0,5 %, 1 %, 1,5 %, 2 % et 2,5 % comparées au dosage du géo-matériau à 0 % de fibres après conservation à 28 jours d'âge. Par conséquent, les résultats de ces essais de résistances caractéristiques nous permettront parmi ces cinq formulations pour chacun des matériaux de base améliorés aux fibres, de retenir les meilleures formulations pour chacune des sollicitations en vue de recommander ces dosages aux populations et idem pour la fabrication des BTC à grande échelle industrielle [5]. Les valeurs de la teneur en eau ainsi que de leur densité sèche respective obtenues à l'optimum Proctor pour les différentes variations des dosages en fibres lors de la pré formulation sont regroupées dans le **tableau 2**.

Tableau 2: Tableau des valeurs à l'optimum pour les dosages en fibres et en eau des mélanges de formulation

Matériau	Dosage en fibres (%)	O.P.M $\gamma_d \text{ max}$	ω_{opt}	Codification
Sara	Néant	1,93	13,5	$B_0SE_{13,5}$
Kawa	Néant	1,95	11,8	$B_0KE_{11,8}$
Sara	0,5	1,90	14,7	$BSF_{0,5}^5E_{14,7}$
Kawa	0,5	1,90	15,2	$BKF_{0,5}^5E_{15,2}$
Sara	1	1,90	14,0	$BSF_1^5E_{14,0}$
Kawa	1	1,91	14,7	$BKF_1^5E_{14,7}$
Sara	1,5	1,91	13,7	$BSF_{1,5}^5E_{13,7}$
Kawa	1,5	1,87	13,3	$BKF_{1,5}^5E_{13,3}$
Sara	2	1,86	14,8	$BSF_2^5E_{14,8}$
Kawa	2	1,87	15,0	$BKF_2^5E_{15,0}$
Sara	2,5	1,83	13,9	$BSF_{2,5}^5E_{13,9}$
Kawa	2,5	1,87	13,5	$BKF_{2,5}^5E_{13,5}$

2-2-1-3. Mode opératoire

L'opération de confection des éprouvettes après la formulation des mélanges du géo-matériau et de l'éco-géo-matériau consiste à tamiser en quantité suffisante le matériau à 20 mm et conserver le tamisât. Sécher ou mettre à l'étuve le tamisât préalablement obtenu et déterminer sa teneur en eau initiale tout en faisant la différence avec la teneur en eau optimale obtenue lors de l'essai Proctor en vue de connaître le dosage en eau de gâchage du mélange pour la confection des éprouvettes. Ensuite, répandre la fraction passante à 20 mm dans un bac d'homogénéisation et la brasser tout en pesant les graveleux latéritiques, les fibres brutes triturées et l'eau à l'aide d'une balance de précision puis humidifier le mélange des matériaux dans un malaxeur à la teneur en eau optimale obtenue précédemment lors de l'essai Proctor modifié jusqu'à rendre homogène le mélange. Après quoi, solidariser l'ensemble moule, embase et lubrifier les parois du moule mais toutefois, placer au fond du moule le disque d'espacement sur lequel sera placé un papier filtre servant aussi d'étiquette pour chaque éprouvette. Finalement, on introduit la quantité de matériau correspondant à la première couche (1/7^{ème} d'une part soit environ 480g) en appliquant 7 cycles de 25 coups à chacune des 7 couches par éprouvette, soit un total de 175 coups, puis démouler avec soin l'éprouvette, peser le matériau démoulé et mesurer sa hauteur [12]. Toutes ces opérations sont répétées sur chaque dosage des 12 codifications de formulation de mélanges énoncées précédemment.

2-2-1-3-1. Formules utilisées pour quantifier les constituants des BTC sans ajout de fibres et leurs applications numériques

Le poids total P_t de matériaux à utiliser pour la formulation du mélange du géo-matériau revient à calculer et à sommer le poids de la latérite crue P_l et le poids de l'eau de mouillage P_e . Pour ce faire, le poids de la latérite crue à utiliser sera égal au poids de l'eau de mouillage ôté du poids du matériau latéritique avec teneur en eau initiale $P_{(\omega_i\%)}$. Or, le poids de l'eau de mouillage est égal au poids du matériau latéritique avec teneur en eau initiale ôté du poids total de matériau à utiliser. Ceci étant, le poids total de matériaux au départ était initialement estimé en faisant le produit entre le volume du moule V_m , la densité sèche maximale de latérite γ_d et la teneur en eau optimale à l'optimum Proctor ω_{opt} . [5]. Ces formules sont présentées comme suit:

- Teneur en eau initiale du matériau ω_i (%) latéritique :

$$\omega_i(\%) = \left(\frac{M_h - M_s}{M_s} \right) \times 100 \quad (1)$$

Avec:

ω_i : teneur en eau initiale

M_h : poids du matériau humide

M_s : poids du matériau sec

- Volume intérieur (V_m) du moule :

$$V_m = \pi r^2 h \quad (2)$$

Avec:

V_m : volume intérieur du moule (cm^3)

r: rayon intérieur du moule (cm)

h: hauteur intérieure du moule (cm)

- Poids total des matériaux (P_t) pour le mélange :

$$P_t \text{ (g)} = [(V_m \times \gamma_d) \times (1 + \frac{\omega_{opt}}{100})] \quad (3)$$

Avec:

P_t : Poids total des matériaux à utiliser pour le mélange

γ_d : Conter valeur de la densité sèche obtenue à l'optimum Proctor du matériau latérite crue

ω_{opt} : Conter valeur de la teneur en eau optimale obtenue à l'optimum Proctor du matériau en %

- Poids des matériaux secs (P_s): latérite :

$$P_s \text{ (g)} = \gamma_d \times V_m \quad (4)$$

- Poids du matériau latéritiques $P_{(\omega_i\%)}$ à utiliser à une teneur en eau initiale :

$$P_{(\omega_i\%)} = P_s \times (1 + \frac{\omega_i}{100}) \quad (5)$$

- Quantité d'eau (P_e) de mouillage :

$$P_e = P_t - P_{(\omega_i\%)} \quad (6)$$

- Poids de la latérite crue à utiliser pour le mélange :

$$P_l = P_{(\omega_i\%)} - P_e \quad (7)$$

- Quantité totale de matériaux à utiliser revient à :

$$P_t = P_l + P_e \quad (8)$$

❖ Application numérique pour le $B_0SE_{13,5}$ [tableau 2]

L'application numérique de cette démarche technique de formulation des BTC revient à appliquer directement les formules précédemment énoncées avec l'une des formulations qui est celle de $B_0SE_{13,5}$ choisie à titre illustratif.

- Teneur en eau initiale des matériaux ω_i (%) latérite à utiliser pour le mélange :

$$\omega_i(\%) = \left(\frac{M_h - M_s}{M_s} \right) \times 100$$

$$\omega_i(\%) = \left(\frac{1000 - 972,76}{972,76} \right) \times 100$$

- **Volume intérieur (V_m) du moule :**

$$V_m = \pi r^2 h$$

Avec:

$$V_m = 1570 \text{ cm}^3$$

- **Poids total des matériaux (P_t) pour le mélange :**

$$P_t \text{ (g)} = [(V_m \times \gamma_d) \times (1 + \frac{\omega_{opt.}}{100})]$$

Avec:

$$P_t \text{ (g)} = [(1570 \times 1,93) \times (1 + \frac{13,5}{100})]$$

$$P_t = 3439 \text{ g}$$

- **Poids du matériau sec (P_s): latérite :**

$$P_s \text{ (g)} = \gamma_d \times V_m$$

$$P_s \text{ (g)} = 1,93 \times 1570$$

$$P_s = 3030 \text{ g}$$

- **Poids de matériaux latéritiques à utiliser à une teneur en eau initiale :**

$$P_{(\omega_i\%)} = P_s \times (1 + \frac{\omega_i}{100})$$

Avec:

$$P_{(\omega_i\%)} = 3030 \times (1 + \frac{2,8}{100})$$

$$P_{(\omega_i\%)} = 3115 \text{ g}$$

- **Quantité d'eau (P_e) de mouillage :**

$$P_e = P_t - P_{(\omega_i\%)}$$

$$P_e = 3439 - 3115$$

$$P_e = 324 \text{ g}$$

- **Poids de la latérite crue à utiliser pour le mélange :**

$$P_l = P_t - P_e$$

$$P_l = 3439 - 324$$

$$P_l = 3115 \text{ g}$$

- **Quantité totale de matériaux à utiliser revient à :**

$$P_t = P_l + P_e$$

$$\begin{array}{l} P_t = 3115 + 324 \\ P_t = 3439 \end{array} \quad \longrightarrow \quad \text{la somme vérifie le poids total des matériaux à utiliser} \quad (8)$$

D'où nous avons pour formule du mélange :

P_t	$P_{\text{latérite}} = 3115 \text{ g}$
	$P_{\text{eau}} = 324 \text{ g}$

2-2-1-3-2. Formules utilisées pour quantifier les constituants des BTC avec ajout de fibres et leurs applications numériques

Le poids total P_t de matériaux à utiliser pour la formulation du mélange de l'éco-géo-matériau revient à calculer et à sommer le poids de la latérite crue P_l , le poids des fibres P_f et le poids de l'eau de mouillage P_e . Pour ce faire, le poids de la latérite crue à utiliser sera égal au poids des fibres ôté du poids du matériau latéritique plus fibres avec teneur en eau initiale $P_{(\omega_i\%)}$. Or, le poids des fibres est égal au produit du poids du matériau latéritique sec plus fibres et du taux de fibres ôté du poids de matériaux latéritiques sec plus fibres P_s . Ceci étant, le poids total de matériaux au départ était initialement estimé en faisant le produit entre le volume du moule V_m , la densité sèche maximale de latérite fibrée γ_d et la teneur en eau optimale à l'optimum Proctor $\omega_{opt.}$. Ces formules sont présentées comme suit:

- Teneur en eau initiale des matériaux ω_i (%) latérite + fibres :

$$\omega_i(\%) = \left(\frac{M_h - M_s}{M_s} \right) \times 100 \quad (1)$$

Avec:

ω_i : teneur en eau initiale du matériau composite latérite + fibres

M_h : poids du matériau humide

M_s : poids du matériau sec

- Volume intérieur (V_m) du moule :

$$V_m = \pi r^2 h \quad (2)$$

Avec:

V_m : volume intérieur du moule (cm^3)

r : rayon intérieur du moule (cm)

h : hauteur intérieure du moule (cm)

- Poids total des matériaux (P_t) pour le mélange :

$$P_t \text{ (g)} = [(V_m \times \gamma_d) \times (1 + \frac{\omega_{opt.}}{100})] \quad (3)$$

Avec:

P_t : poids total des matériaux à utiliser pour le mélange

γ_d : conférer valeur de la densité sèche obtenue à l'optimum Proctor du matériau amélioré de fibres de molinie bleue

$\omega_{opt.}$: conférer valeur de la teneur en eau optimale obtenue à l'optimum Proctor du matériau en %

- Poids des matériaux secs (P_s): latérite + fibres :

$$P_s \text{ (g)} = \gamma_d \times V_m \quad (9)$$

- Poids de fibres (P_f) à utiliser pour le mélange :

$$P_f (g) = P_s - (P_s \times \frac{(100-\%Fibres)}{100}) \quad \text{Ou} \quad (10)$$

$$P_f (g) = \frac{P_s \times \%Fibres}{100 - \%Fibres}$$

- Poids de matériaux latéritiques + fibres ($P_{(\omega_i\%)}$) à utiliser à une teneur en eau initiale :

$$P_{(\omega_i\%)} = P_s \times (1 + \frac{\omega_i}{100}) \quad (11)$$

- Quantité d'eau (P_e) de mouillage :

$$P_e = P_t - P_{(\omega_i\%)} \quad (12)$$

- Poids de la latérite crue à utiliser pour le mélange :

$$P_l = P_{(\omega_i\%)} - P_f \quad (13)$$

- Quantité totale de matériaux à utiliser revient à :

$$P_t = P_l + P_f + P_e \quad (14)$$

❖ **Application numérique pour le $BKF_{0,5}^5 E_{15,2}$ [tableau 2]**

L'application numérique de cette démarche technique de formulation des BTC avec ajout de fibres revient à appliquer directement les formules précédemment énoncées avec l'une des formulations qui est celle de $BKF_{0,5}^5 E_{15,2}$ choisie à titre illustratif.

- Teneur en eau initiale des matériaux ω_i (%) latérite + fibres à utiliser pour le mélange :

$$\omega_i(\%) = (\frac{M_h - M_s}{M_s}) \times 100$$

Avec :

$$\omega_i(\%) = (\frac{1000 - 975,60}{975,60}) \times 100$$

$$\omega_i = 2,5 \%$$

- Volume intérieur (V_m) du moule :

$$V_m = \pi r^2 h$$

Avec:

$$V_m = \pi 5^2 \times 20$$

$$V_m = 1570 \text{ cm}^3$$

- Poids total des matériaux (P_t) pour le mélange

$$P_t (g) = [(V_m \times \gamma_d) \times (1 + \frac{\omega_{opt}}{100})]$$

$$P_t (g) = [(1570 \times 1,90) \times (1 + \frac{15,2}{100})]$$

$$P_t = 3436 \text{ g}$$

- Poids des matériaux secs (P_s): latérite + fibres

$$P_s (g) = \gamma_d \times V_m$$

$$P_s (g) = 1,90 \times 1570$$

$$P_s = 2983 \text{ g}$$

- Poids de fibres (P_f) à utiliser pour le mélange

$$P_f (g) = P_s - (P_s \times \frac{(100 - \%Fibres)}{100})$$

Avec: $P_f (g) = 2983 - (2983 \times \frac{(100 - 0,5)}{100})$

$$P_f = 15 \text{ g}$$

- Poids de matériaux latérite + fibres ($P_{(\omega_i\%)}$) à utiliser à une teneur en eau initiale :

$$P_{(\omega_i\%)} = P_s \times (1 + \frac{\omega_i}{100})$$

Avec:

$$P_{(\omega_i\%)} = 2983 \times (1 + \frac{2,5}{100})$$

$$P_{(\omega_i\%)} = 3058 \text{ g}$$

- Quantité d'eau (P_e) de mouillage :

$$P_e = P_t - P_{(\omega_i\%)}$$

Avec:

$$P_e = 3436 - 3058$$

$$P_e = 378 \text{ g}$$

- Poids de la latérite crue à utiliser pour le mélange :

$$P_l = P_{(\omega_i\%)} - P_f$$

Avec:

$$P_l = 3058 - 15$$

$$P_l = 3043 \text{ g}$$

- Quantité totale de matériaux à utiliser revient à :

$$P_t = P_l + P_f + P_e$$

$$P_t = 3043 + 15 + 378$$

$$P_t = 3436$$



La somme vérifie le poids total des matériaux à utiliser (14)

D'où nous avons pour formule du mélange:

P_t	$P_{latérite} = 3043 \text{ g}$
	$P_{fibres} = 15 \text{ g}$
	$P_{eau} = 378 \text{ g}$

Au total il a été confectionnées 144 éprouvettes de BTC à raison de 12 éprouvettes par dosages de fibres de molinie bleue pour un total de 6 dosages allant de 0 % à 2,5 % pour chacun des 2 matériaux basiques de Sara et Kawa. Les éprouvettes (BTC) confectionnées avec et sans ajout de fibres sont conservées dans une chambre climatique à une température de $20 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ et une humidité relative de $50\% \pm 5\%$ pendant 28 jours jusqu'à stabilisation de leur masse comme l'illustre la **figure 4**.



Figure 4 : Les éprouvettes de BTC de Sara et de Kawa améliorées de 0 % à 2,5 % aux fibres de molinie bleue et conservées dans une chambre climatique à une température de $20 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ et une humidité relative de $50\% \pm 5\%$

2-2-2. Caractérisation mécanique des BTC

La détermination des résistances en compression, en traction par fendage, en flexion et en cisaillement sont données par les expressions suivantes:

- Pour la résistance à la compression σ_c , les éprouvettes sont chargées par une force P sur une face circulaire de diamètre D [13, 16] :

$$\sigma_c = \frac{4P}{\pi D^2} \quad (15)$$

- Pour la résistance à la traction par fendage σ_d , les éprouvettes sont posées sur un contact linéaire h sur les deux faces opposées, une section de diamètre D et soumises à une charge P [5, 16] :

$$\sigma_d = \frac{2P}{\pi \cdot D \cdot h}$$

- Pour la résistance à la flexion σ_f , elle est fonction d'un moment de flexion M_f égale au quart du produit de la charge P et de la longueur de la travée, de l'inertie I de l'éprouvette et de la distance au neutre ou de la distance du centre de gravité Y égale au rayon R [5] :

$$\sigma_f = \frac{|M|}{I} \times Y \quad (17)$$

- Pour la résistance au cisaillement, une charge P est appliquée sur les éprouvettes sur une face circulaire de diamètre D , ce qui fait développer une contrainte latérale τ [14] :

$$\tau = \frac{2P}{\pi.D.h} \quad (18)$$

Les tests de résistance mécanique sur les éprouvettes ont été réalisés à travers les dispositifs expérimentaux illustrés à la **figure 5**.



Figure 5 : Tests de résistance mécanique à la presse sur les éprouvettes de BTC

3. Résultats

Les résultats à l'issu des tests de résistance mécanique sur les éprouvettes des géo-matériaux et des éco-géo-matériaux sont présentés de façon sélective par élimination dégressive en fonction des meilleures performances mécaniques, de la combinaison des sollicitations au détriment des moyennes ou faibles performances ainsi que la résistance de chacune des sollicitations prises isolément [5].

3.1. Deux meilleures formulations provisoirement retenues

Au vu des résultats des tests de résistance mécanique, on constate que le dosage en fibres à 0,5 % dans les BTC fibrés à base des graveleux latéritiques de Sara a entraîné une légère baisse de la résistance à la compression comparé au BTC sans fibres c'est-à-dire de 2,04 MPa pour $B_0SE_{13,5}$ à 1,95 MPa pour $BSF_{0,5}^5E_{14,7}$. Cette contre-performance peut être due à la conjugaison de deux mécanismes: l'augmentation de la porosité avec l'ajout des fibres et la réduction de la cohésion entre les particules des fibres et des graveleux latéritiques dues à son indice de plasticité inférieur à celui de Kawa [2]. Par conséquent, les deux meilleures performances à retenir pour chacune des quatre sollicitations vis-à-vis de chacun des deux matériaux basiques sont consignées dans le **tableau 3**.

Tableau 3: Formulations des BTC retenues provisoirement en fonction des deux meilleures résistances obtenues pour chacune des quatre sollicitations

		Sollicitations							
		Compression		Traction		Flexion		Cisaillement	
Matériaux basiques		SARA		KAWA		Formulation		σ_c (MPa)	
		$B_0SE_{13,5}$	$BSF_{0,5}^5E_{14,7}$	$BKF_{1,5}^5E_{13,3}$	$BKF_{0,5}^5E_{15,2}$	$B_0SE_{13,5}$	$BSF_{1,5}^5E_{13,7}$	$BKF_{0,5}^5E_{13,3}$	$BKF_{1,5}^5E_{13,3}$
Formulation	σ_d (MPa)	Formulation	σ_f (MPa)	Formulation	τ (MPa)				
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33
		2,04	1,95	2,72	0,44	0,29	0,64	1,28	2,33

3.2. Meilleures formulations en fonction de la combinaison des sollicitations vis-à-vis de chaque matériau basique

Du point de vue combinaison des sollicitations et comparativement aux éprouvettes témoins sans fibres, on note un dualisme de sollicitations pour les BTC fibrés à base des graveleux latéritiques de Sara, plus précisément celui de la résistance à la compression et au cisaillement pour un dosage en fibres de 0,5 %, soit une augmentation de la résistance mécanique de 11,27%, ainsi que celui de la résistance à la traction et à la flexion pour un dosage en fibres de 1,5 %, soit une augmentation en moyenne des résistances mécaniques à la traction et à la flexion de 41,43% . On note également pour les BTC fibrés à base des graveleux latéritiques de Kawa une combinaison des quatre sollicitations pour un dosage de 0,5 % de fibres, soit une augmentation en moyenne des résistances mécaniques à la compression, à la traction, à la flexion et au cisaillement de 38,78 %; une combinaison de deux sollicitations, compression et traction pour un dosage en fibres de 1,5 %, soit une augmentation en moyenne des résistances mécaniques à la compression et à la traction de 48,84 % et la sollicitation à la flexion à un dosage en fibres de 2,5 % prise isolément, soit une augmentation de la résistance mécanique à la flexion de 106,45% [5].

Les résultats de ces combinaisons de sollicitations de Sara et de Kawa sont consignés respectivement dans les **tableaux 4 et 5**.

Tableau 4: Tableau des meilleures formulations fibrées de Sara vis-à-vis de la combinaison des sollicitations

Paramètres	Meilleures formulations
Résistance à la compression Résistance au cisaillement	$BSF_{0,5}^5 E_{14,7}$
Résistance à la traction Résistance à la flexion	$BSF_{1,5}^5 E_{13,7}$

Tableau 5: Tableau des meilleures formulations fibrées de Kawa vis-à-vis de la combinaison des sollicitations

Paramètres	Meilleures formulations
Résistance à la traction Résistance au cisaillement Résistance à la compression Résistance à la flexion	$BKF_{0,5}^5 E_{15,2}$
Résistance à la compression Résistance à la traction	$BKF_{1,5}^5 E_{13,3}$
Résistance à la flexion	$BKF_{2,5}^5 E_{13,5}$

3.3. Meilleure formulation du BTC fibré définitivement retenue

Du point de vue économie de matériau notamment en dosage des fibres de molinie bleue, de meilleure résistance mécanique et de la combinaison de résistance des BTC aux quatre sollicitations, la formulation définitive à retenir dans le cadre de notre étude entre les deux éco-géo-matériaux confectionnés à base des graveleux latéritiques de Sara et de Kawa intégrant les fibres de molinie bleue est la formulation de Kawa dosé à 0,5 % de fibres de molinie bleue car cet éco-géo-matériau est capable simultanément de résister aux quatre sollicitations comme présenté dans le **tableau 6** [5].

Tableau 6: Choix définitif de la meilleure formulation de l'éco-géo-matériau

Paramètres	Meilleure formulation retenue définitivement
Résistance à la traction Résistance au cisaillement Résistance à la compression Résistance à la flexion	$BKF_{0,5}^5 E_{15,2}$

4. Discussion

Au vue de l'analyse des résultats, les valeurs des résistances mécaniques des différentes formulations fibrées vis-à-vis des tests réalisés issus des quatre sollicitations, il révèle que les deux meilleures formulations en terme de résistance à la compression sont celles des BTC fibrés de Kawa $BKF_{1,5}^5 E_{13,3}$ et $BKF_{0,5}^5 E_{15,2}$. Les meilleures formulations en termes de résistance à la flexion sont celles des BTC fibrés de Kawa $BKF_{2,5}^5 E_{13,5}$ et $BKF_{0,5}^5 E_{15,2}$. En effet, une étude similaire avait été faite par [2] à la seule différence que les matériaux associés aux sols argileux étaient des fibres de kénaf mais par conséquent, les résultats des performances mécaniques à la compression et à la flexion trouvés par cet auteur étaient voisins à la présente étude. Les meilleures formulations en termes de résistance à la traction par fendage sont celles des BTC fibrés de Kawa $BKF_{0,5}^5 E_{15,2}$ et $BKF_{1,5}^5 E_{13,3}$. La meilleure formulation en termes de résistance mécanique au cisaillement est celles du BTC fibré de Kawa

$BKF_{0,5}^5 E_{15,2}$. [1, 15] se sont intéressés à l'étude des BTC renforcés respectivement avec des fibres de palmier dattier brutes, des granulats de béton recyclé et les résultats des performances mécaniques à la traction et au cisaillement obtenus sont aussi significatifs comme dans le cadre de notre présente étude.

Le choix définitif de la formulation de l'éco-géo-matériau dans le cadre de notre étude s'est porté sur le BTC fibré à 0,5 % à base des graveleux latéritiques de Kawa, le $BKF_{0,5}^5 E_{15,2}$, justifié par la validation simultanée de l'aspect mécanique, technique et économique dans les constructions. L'aspect mécanique validé a consisté en la combinaison des résistances aux quatre sollicitations qui sont la compression, la traction, la flexion et le cisaillement de telle sorte que cette formulation fibrée soit capable de résister simultanément aux quatre sollicitations précitées. L'aspect technique validé a consisté en l'approbation des propriétés géotechniques des graveleux latéritiques de Kawa plus performant que ceux de Sara. L'aspect économique par contre a consisté au choix de la formulation des BTC auxquels les matériaux de renfort qui sont les fibres de molinie bleue ajoutées au mélange sont à faible dose (0,5 %) [5].

5. Conclusion

Le travail présenté dans cette étude s'inscrit dans une thématique de développement durable à travers l'usage des matériaux innovants pour une durabilité des constructions. Nous nous sommes intéressés dans cette étude à l'amélioration des performances mécaniques du BTC, en exploitant les matériaux de l'architecture traditionnelle: la terre, les fibres naturelles, notamment celles de la molinie bleue qui constitue l'une des richesses abondantes de l'écosystème du Togo encore sous-exploitées ou ignorées par les populations de nos jours. Il ressort après confection et soumission des éprouvettes de BTC aux tests de résistance que l'ajout des fibres de molinie bleue a conduit à une amélioration significative de la résistance mécanique notamment de la résistance à la flexion et au cisaillement des blocs de Sara et surtout à l'amélioration de la résistance à la traction, au cisaillement, à la compression et à la flexion des BTC de Kawa. A cet effet, le meilleur résultat à retenir en fonction de la résistance mécanique optimale issue de la combinaison du maximum des sollicitations (résistance à la traction, au cisaillement, à la compression et à la flexion) ainsi que de l'aspect économique en dosage de fibres de molinie bleue est obtenu avec les blocs de Kawa dosés à 0,5 % de fibres de longueur standard de 5 cm dosés à 15,2 % d'eau ($BKF_{0,5}^5 E_{15,2}$).

Au terme de cette étude, nous recommandons au besoin, un choix rationnel de chacune des formulations de l'éco-géo-matériau comme un référentiel de dosage pour les populations togolaises et celles d'Afrique dépendamment du type de sollicitations auxquelles seront soumises les constructions en blocs de terre comprimée en vue d'une amélioration des performances mécaniques des BTC pour pérenniser les constructions en terre.

Références

- [1]- B. TAALLAH, “Etude du comportement physico-mécanique du bloc de terre comprimée avec fibres” Thèse unique, Université Mohamed Khider, Biskra, (2014) 165p.
- [2]- A.B. LAIBI, “Comportement hygro-thermomécanique de matériaux structuraux pour la construction associant des fibres de Kénaf à des terres argileuses ”, thèse unique, Université de Normandie (2017) 225p.
- [3]- C. MAGNIONT, “Contribution à la formulation et à la caractérisation d’un écomatériau de construction à base d’agro ressources” Thèse unique, Université de Toulouse, (2010) 305p.
- [4]- Y. TARDY and D. NAHON, “Geochemistry of laterites, stability of aluminous goethite, aluminous hematite and ferrous kaolinite in bauxites and ferricretes; approach to the formation mechanism of concretions”, American Journal of Science, California, vol.285, N°10, 12 (1985) 865-903, URL: <https://ajsonline.org/article/60331>, (juin 2024)
- [5]- I. MAMAH, “Formulation d’un éco-géo-matériau à base des graveleux latéritiques associant des fibres de molinie bleue (*molinia caerulea moorhexe*) en vue d’une amélioration des caractéristiques mécaniques pour la durabilité des constructions en blocs de terre comprimée au Togo” Ph.D Thesis in Structural Engineering, Bircham International University (BIU), Madrid (2025) 179p.
- [6]- Association française de normalisation AFNOR, Norme XP P94-047, “Détermination de la teneur pondérale en matières organiques d’un matériau, méthode par calcination”, décembre 1998, Paris, URL: <https://urls.fr/2L0XEL>, (juillet 2024)
- [7]- Association française de normalisation AFNOR, Norme NF EN 933-1, “Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats-partie 1: détermination de la granularité-Analyse granulométrique par tamisage”, mai 2012, Paris, URL: <https://urls.fr/rIwxGM>, (juillet 2024)
- [8]- K. B. AMEY, K. NEGLO, S. TAMBA, A. K. C. JOHNSON, Y. E. KOUTO, E. NAYO “Caractérisation physique de sables silteux au Togo”, Afrique Science, 10 (2) (2014) 53-69, <http://afriquescience.info>, (mars 2025)
- [9]- Association française de normalisation AFNOR, Norme NF ISO 17892-12 “Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols-Partie 12: détermination des limites de liquidité et de plasticité”, juillet 2018, Paris, URL: https://urls.fr/-Z-_Fm, (août 2024)
- [10]- Association française de normalisation AFNOR, Norme NF EN 933-9, “Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats-Partie 9: qualification des fines- Essais au bleu de méthylène”, février 2022, Paris, URL: <https://urls.fr/kyg-Vu>, (août 2024)
- [11]- Association française de normalisation AFNOR, Norme NF P 94-068, “Sols: reconnaissance et essais- Mesure de la capacité d’adsorption de bleu de méthylène d’un sol ou d’un matériau rocheux- Détermination de la valeur de bleu de méthylène d’un sol ou d’un matériau rocheux par l’essai à la tache”, octobre 1998, Paris, URL: <https://urls.fr/aucYaN>, (août 2024)
- [12]- Association française de normalisation AFNOR, Norme NF P 94-093, “Sols: reconnaissance et essais- Détermination des références de compactage d’un matériau- Essai Proctor Normal - Essai Proctor Modifié”, octobre 2014, Paris, URL: <https://urls.fr/X7Muvu>, (août 2024)
- [13]- Association française de normalisation AFNOR, Norme NF EN 12390-3, “Essai pour béton durci- Partie 3: résistance à la compression des éprouvettes”, juin 2019, Paris, URL: <https://urls.fr/aiECbM>, (septembre 2024)
- [14]- Association française de normalisation AFNOR, Norme NF EN ISO 17892-10, “Reconnaissance et essais géotechniques- Essais de laboratoire des sols - Partie 10: essai de cisaillement direct”, décembre 2018 Paris, URL: <https://urls.fr/DFnWi5>, (septembre 2024)
- [15]- J. EID “Elaboration d’un éco-géo-matériau à base de terre crue” Thèse unique, Université de Normandie, (2016) 311p.
- [16]- A. P’kla, K. B. AMEY, K. NEGLO “Caractérisation géotechnique du sable silteux utilisé en couche de Chaussée au sud du Togo et du Bénin”, J. Rech. Sci. Univ. Lomé (Togo), 2016, Série E, 18(3): 185-194