

Étude comparative des propriétés mécaniques de blocs de terre comprimés stabilisés, fabriqués avec des argiles mauritaniennes

Louleide Madi^{1,2}, Khadim Ndiaye², Prosper Pliya², Mohamed Cheikh Teguedy³,

Salima Aggoun², Dah Ahmedou Memoune¹,

¹ *Unité de Recherche Sciences des Matériaux et Environnement, Faculté des Sciences et Techniques, Université de Nouakchott, Nouakchott, Mauritanie.*

² *Laboratoire de Mécanique et Matériaux de Génie Civil (L2MGC), CY Cergy Paris Université, F-95031, France.*

³ *Département de génie civil, École supérieure polytechnique de Nouakchott, Nouakchott, Mauritanie.*

RESUME

En Mauritanie, les matériaux locaux géosourcés et biosourcés offrent une alternative durable aux parpaings à base de ciment, connus pour leur faible efficacité énergétique. Cette étude vise à évaluer les performances mécaniques de blocs de terre comprimée (BTC) obtenus à partir d'argiles issues de trois régions de la Mauritanie et du sable de dune, stabilisées avec différentes proportions de chaux et de ciment. Les argiles ont été préalablement caractérisées en laboratoire (granulométrie, limites d'Atterberg, ATD-ATG, DRX). À partir des caractéristiques des argiles, dix-huit compositions ont été élaborées en préparant six mélanges par type de sol. Un premier mélange de référence est réalisé et ne contient que le sol sans ajout. Un second mélange associe 70 % de sol et 30 % de sable (constitué de 70% de sable concassé (0-3) et de 30% de sable de dune). Deux mélanges comprennent les mêmes proportions de sol et de sable, avec l'addition respective de 5 % et de 8 % de ciment. Enfin, les deux derniers mélanges intègrent le sol, le sable et la chaux : à des proportions massiques de 8 % et 10 %. Bien que la stabilisation avec le ciment et la chaux ait entraîné une augmentation significative des résistances mécaniques, les valeurs obtenues restent néanmoins inférieures au seuil de 4 MPa, recommandé par la norme XP P13-901.

Mots-clefs Argile, Sable de dune, BTC, Stabilisation chimique, Résistance à la compression.

I. INTRODUCTION

Dans un contexte de développement durable, le choix de matières premières respectueuses de l'environnement est devenu indispensable dans le secteur du bâtiment. La production de ciment consomme des combustibles fossiles non renouvelables et génère une quantité importante de CO₂, ce qui a un impact négatif sur l'environnement [1]. En termes d'empreinte carbone, le ciment présente un impact relativement élevé [2]. Récemment, l'attention s'est portée sur la réduction de

l'empreinte carbone de l'industrie de la construction. Les argiles et les matériaux biosourcés, reconnus pour leur faible impact environnemental, sont utilisés pour les constructions écologiques. En Mauritanie, pays saharien, sahélien et littoral, l'usage de matériaux locaux à faible impact environnemental devient de plus en plus une nécessité. Le pays fait face à des sécheresses chroniques, à une forte croissance démographique, à une urbanisation rapide et à une paupérisation touchant une grande partie de sa population [3]. Le climat de la Mauritanie est globalement désertique, très chaud et très sec, même si les températures sont relativement tempérées sur le littoral, avec des valeurs qui peuvent atteindre 50 °C en été. Environ deux tiers de l'électricité totale produite en Mauritanie sont nécessaires pour assurer le confort thermique dans les bâtiments [4]. Les données disponibles montrent que la consommation d'énergie a atteint environ 1111,796 GWh en 2019 [4]. Entre 2017 et 2019, la consommation d'énergie a augmenté en moyenne de 7 % par an, principalement à cause de la climatisation des bâtiments [4].

Le matériau "terre" utilisé depuis des millénaires est connu pour être abondant, recyclable [1] et thermiquement inerte [5], car la terre crue possède de bonnes qualités de régulation hygrothermique pour le maintien d'un climat confortable dans les bâtiments [6]. Cependant, il présente des inconvénients tels que sa sensibilité à l'eau et sa fragilité [6]. Parmi les méthodes de construction en terre, la technique du bloc de terre comprimée (BTC) présente plusieurs avantages. Les BTC sont dix fois plus efficaces que les briques cuites quant à la régulation de l'humidité [7].

Les résultats de Valenzuela et al. [8] ont montré que les briques de terre comprimée par la presse hydraulique présentent une résistance en compression supérieure de 130 % et une résistance à la traction supérieure de 63 % par rapport aux briques de terre non compactée.

Les nouveaux matériaux de construction innovants joueront un rôle crucial dans l'avenir. En fait, Javed et al. [9] ont proposé des solutions écologiques en utilisant des briques de terre comprimée non cuites à base d'argile-chaux-bentonite et ont obtenu une résistance à la compression de 10MPa. Ce travail s'intéresse à l'exploitation des argiles de trois régions mauritaniennes et du sable de dune pour la fabrication de BTC en mettant l'accent sur leurs propriétés mécaniques. L'objectif est de comparer différentes formulations afin d'optimiser la résistance et la durabilité des blocs. Cette approche s'inscrit dans une démarche de valorisation des ressources locales et de promotion de techniques constructives respectueuses de l'environnement, répondant aux besoins d'une urbanisation croissante et aux défis climatiques de la région. La résistance à la compression est la propriété la plus recherchée des BTC [10]. La norme XP P13-901 recommande une résistance minimale de 4 MPa pour les BTC [11]. Cette étude apporte des résultats préliminaires sur les propriétés mécaniques des argiles mauritaniennes, un sujet encore peu exploré.

II. METHODOLOGIE

A. Matériaux utilisés

Dans ce travail, on a utilisé trois échantillons de sols prélevés dans trois régions différentes en Mauritanie :

L'échantillon de Chinguetti noté « CH » (Fig. 1.a) ; L'échantillon de Oualata noté « O » (Fig. 1.b) ; L'échantillon de Sélibabi noté « S » (Fig. 1.c) ;

Le sable concassé (0-3) utilisé provient de la carrière de Soukoug à Nouakchott pour la correction granulaire du sol (Fig. 1.d). Pour valoriser le sable de dune, abondant en Mauritanie, un mélange de 30 % de sable de dune et 70 % de sable concassé est utilisé pour la fabrication des BTC, noté « SCD ». Le sable de dune utilisé provient de la zone de sortie nord de Nouakchott (Fig. 1.e).



FIGURE 1. Matériaux utilisés: a) sol « CH »; b) Sol « O »; c) Sol « S »; d) Sable concassé; e) Sable de dune

Pour la stabilisation, un liant cimentaire CEM I 52,5 N PM-CP2, noté « C », ainsi que de la chaux aérienne éteinte, notée « CA », ont été ajoutés.

Les résultats de BOUAZZA et al. [12] ont montré que l'ajout de sable de dune dans les BTC augmente la résistance à la compression pour des pourcentages allant de 2 % à 4 %. La variation de la résistance mécanique dépend de plusieurs facteurs : la teneur et le type de liant utilisé, ainsi que la nature et la composition minéralogique du sol, qui peut jouer un rôle très important dans les réactions chimiques [13,14]. Un sol argileux est fortement influencé par les variations d'humidité, ce qui peut altérer sa cohésion et sa résistance. Par contre un sol sableux, bien que moins réactif chimiquement, offre une résistance mécanique plus stable, mais généralement plus faible en l'absence de liant approprié [15].

B. Caractérisation des matières premières

La composition minéralogique des sols a été identifiée par diffraction des rayons X à l'aide d'un diffractomètre automatisé Brüker D8 Advance équipé d'un rayonnement $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$).

L'analyse thermique différentielle et gravimétrique (ATD-ATG) a été réalisée avec un analyseur thermique simultané NETZSCH STA. Les essais ATD-ATG ont été menés de la température ambiante à 1000 °C à une vitesse de 5 °C/min.

Le PH des sols a été déterminé par un pH-mètre METTLER TOLEDO Seven Compact Duo conformément à la norme NF EN ISO 10390 [16].

La distribution granulométrique des sols a été déterminée par l'essai au granulométrie laser suivant la norme NF EN ISO 17892-4 [17].

La limite de plasticité (w_p) a été déterminée conformément à la norme NF EN ISO 17892-12 [18]. La limite de liquidité (w_L) a été obtenue avec l'appareil de Casagrande [18]. Par ailleurs, le diagramme de Casagrande est utilisé pour la classification des trois sols. L'indice de plasticité (I_p) est ensuite calculé avec l'équation (1) :

$$I_p = w_L - w_p \quad (1)$$

I_p : Indice de plasticité du sol, Sans unité (différence entre deux pourcentages)

w_L : Limite de liquidité exprimée en pourcentage (%)

w_P : Limide de plasticité exprimée en pourcentage (%)

L'essai au bleu de méthylène permet de mesurer la capacité d'adsorption et l'activité de la fraction argileuse des échantillons. Il est réalisé conformément à la norme NF EN 933-9 [19]. La valeur du bleu permet de classer les sols selon le classement du GTR 92 [20].

L'activité des argiles (ACB) est le rapport entre la valeur de bleu de méthylène (MB) et la teneur en argile (C). Elle est calculée à partir de l'équation (2) :

$$A_{CB} = \frac{MB}{C} \quad (2)$$

ACB : L'activité de la fraction argileuse, Sans dimension (puisque c'est un rapport entre deux quantités de même unité).

MB : est la valeur de bleu de méthylène exprimée en grammes de bleu pour 100 g de matériau

C : le pourcentage de la fraction 0-2 μm

La valeur de l'activité permet de classer les sols selon le classement de Lautrin [21].

C. Préparation des BTC

Tout d'abord, les matières premières ont été séchées à 105 °C dans le four du laboratoire jusqu'à l'obtention d'une masse constante. La masse est considérée constante lorsque la variation entre deux pesées successives, réalisées à 24 heures d'intervalle, ne dépasse pas 0,1 g.

Pour chaque sol, six formulations ont été réalisées en utilisant des proportions massiques. Le premier mélange contient le sol seul. Le second mélange associe 70 % de sol à 30 % de sable SCD. Les deux mélanges suivants reprennent les mêmes proportions de sol et de sable, avec l'ajout de 5 % et 8 % de ciment. Les deux derniers mélanges remplacent le ciment par de la chaux, avec des proportions respectives de 10 % et 12 %.

Pour chaque formulation, les différents composants ont été malaxés à sec jusqu'à homogénéisation. Ensuite, la quantité d'eau correspondant à l'optimum Proctor du sol a été ajoutée, puis le mélange a de nouveau été malaxé jusqu'à homogénéisation.

Les mélanges ont été ensuite compactés sous une énergie de compactage de 5 MPa à l'aide d'une presse électromécanique (Fig 2.a). Un moule avec piston est utilisé pour préparer les éprouvettes de forme cylindrique de dimensions 5 × 10 cm ($\varnothing \times h$) (Fig 2.b).

Les échantillons fabriqués ont ensuite été conservés à température ambiante dans le laboratoire pendant 28 jours pour assurer leur cure [22,23].

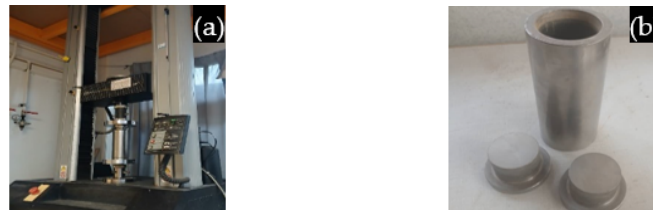


FIGURE 2. Matériel de compactage : a) Presse ; b) Moule pour la préparation des éprouvettes

- Codification des BTC fabriqués :

Les dix-huit formulations réalisées sont présentées ci-dessous (Tableau 1) :

TABLEAU 1. Différentes combinaisons de mélanges des BTC

Designation	Sol CH (%m)	Sol « O » (%m)	Sol « S » (%m)	Sable « SCD » (%m)	Ciment « C » (%m)	Chaux « CA » (%m)
CH(Ref)	100	0	0	0	0	0
O(Ref)	0	100	0	0	0	0
S(Ref)	0	0	100	0	0	0
CH70-SCD30	70	0	0	30	0	0
O70-SCD30	0	70	0	30	0	0
S70-SCD30	0	0	70	30	0	0
CH70-SCD30-C5	70	0	0	30	5	0
O70-SCD30-C5	0	70	0	30	5	0
S70-SCD30-C5	0	0	70	30	5	0
CH70-SCD30-C8	70	0	0	30	8	0
O70-SCD30-C8	0	70	0	30	8	0
S70-SCD30-C8	0	0	70	30	8	0
CH70-SCD30-CA10	70	0	0	30	0	10
O70-SCD30-CA10	0	70	0	30	0	10
S70-SCD30-CA10	0	0	70	30	0	10
CH70-SCD30-CA12	70	0	0	30	0	12
O70-SCD30-CA12	0	70	0	30	0	12
S70-SCD30-CA12	0	0	70	30	0	12

D. Résistance à la compression des BTC

Les essais de résistance à la compression ont été réalisés sur des échantillons cylindriques de dimensions 5 × 10 cm ($\varnothing \times h$). Ces essais ont été effectués à l'aide d'une presse d'une capacité de 30 kN et d'une vitesse de chargement de 0,05 MPa/s, conformément aux recommandations de la norme NF EN 772-1+A1 [24].

III. RESULTATS ET DISCUSSION

A. Propriétés physiques

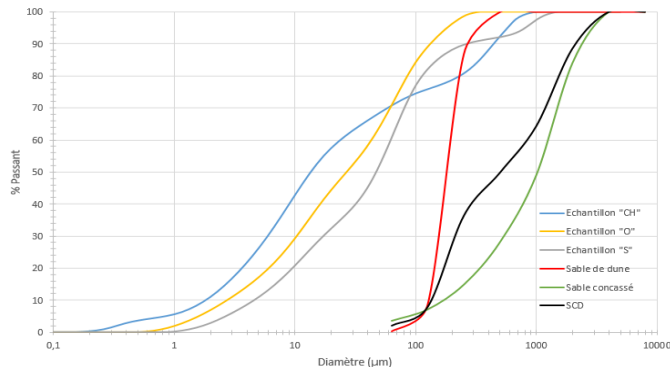
1. distribution granulométrique

La distribution granulométrique des trois échantillons de sol, du sable concassé, du sable de dune et du mélange de sable utilisé « SCD » est présentée dans la Fig. 3.

Le tableau 2 résume la composition granulométrique de nos échantillons présentée à la Fig.4. On remarque que nos échantillons sont majoritairement composés de limons et le sol « CH » présente le plus grand pourcentage d'argile.

TABLEAU 2. Composition granulométrique des échantillons

Sol	CH	O	S
Argile (< 2 μm)	11 %	7 %	3 %
Limon (2-63 μm)	60 %	63 %	57 %
Sable (> 63 μm)	29 %	30 %	40 %

**FIGURE 3. Analyse granulométrique des échantillons**

2. Plasticité

La plasticité du matériau est évaluée en déterminant les limites d'Atterberg : la limite de liquidité (w_L) et la limite de plasticité (w_P), indispensables pour calculer l'indice de plasticité (I_p) (tableau 3).

La détermination des limites d'Atterberg et de l'indice de plasticité permet de classer les sols selon le diagramme de plasticité de Casagrande [18].

Les résultats montrent que les sols « O » et « CH » sont classés comme des limons et sols organiques peu plastiques, avec le sol « CH » présentant la plasticité la plus faible des trois. Le sol « S » est classé comme une argile peu plastique, caractérisée par une plasticité modérée.

La faible plasticité des trois échantillons peut être attribuée à leur faible teneur en argile, à l'absence d'argile gonflante et à la dominance du quartz [28].

TABLEAU 3. Résultats de l'essai des limites d'Atterberg

Sol	w_L	w_P	I_p	Classification
O	44,2%	31,5%	12,7%	Limons et sols organiques peu plastiques (Op)
CH	23,7%	18,6%	5,1%	Limons et sols organiques peu plastiques (Op)
S	35,0%	22,9%	12,1%	Argiles peu plastiques (Ap)

3. L'essai au bleu de méthylène

Le tableau 4 présente les résultats de l'essai au bleu de méthylène. Selon la classification du GTR 92 [20], l'échantillon « CH » correspond à un sol limoneux sensible à l'eau. L'échantillon « O » est un sol sablo-argileux peu plastique, tandis que l'échantillon « S » est un sol limoneux de plasticité moyenne.

Ces résultats sont cohérents avec ceux de l'analyse granulométrique. Concernant l'activité de la fraction argileuse, l'échantillon « CH » présente une fraction argileuse moyennement active, tandis que les échantillons « O » et « S » présentent des fractions argileuses très actives.

TABLEAU 4. Résultats de l'essai au bleu de méthylène

	Sol "CH"	Sol "O"	Sol "S"
Valeur de bleu du méthylène (MB)	1,00	2,04	4,11
Classification selon la valeur MB [20]	$0,2 \leq MB < 1,5$ Sol sablo limoneux, sensible à l'eau	$1,5 \leq MB < 2,5$ Sol sablo argileux, peu plastique	$2,5 \leq MB < 6$ Sol limoneux de plasticité moyenne
Activité de la fraction argileuse (Ac)	9,12	29,09	136,98
Classification selon la valeur Ac [21]	$5 < Ac < 13$ Fraction argileuse moyenne active	$Ac > 18$ Fraction argileuse très active	$Ac > 18$ Fraction argileuse très active

3. L'essai Proctor

Le tableau 5 présente les résultats de l'essai Proctor normal utilisé pour la détermination de la quantité d'eau à ajouter pour la fabrication de BTC qui correspond à la teneur en eau optimale w_{OPN} .

L'essai Proctor a été réalisé suivant la norme NF P94-093 [25].

Le sol « O », ayant le plus grand indice de plasticité, a tendance à nécessiter plus d'eau pour atteindre une compacité maximale sans devenir trop mou. Cela explique qu'il présente la teneur en eau la plus élevée, soit 12,5 %. Les résultats obtenus permettent d'optimiser le dosage en eau afin d'assurer une meilleure compacité et résistance des BTC.

TABLEAU 5. Résultats de l'optimum Proctor normal

Sol	CH	O	S
w_{OPN} (%)	8,5	12,5	7,5

B. Composition minéralogique

La figure 4 présente les spectres DRX des trois sols étudiés. Les spectres DRX révèlent que tous les échantillons contiennent une quantité significative de quartz (SiO_2). Cette abondance en quartz a également été constatée dans l'étude de Ely (2010) qui a étudié des argiles de la zone de Nouakchott et de Rosso dans le sud. Cette dernière est une ville de la moyenne vallée du fleuve Sénégal, tout comme Sélibabi, d'où provient notre échantillon « S ». [26].

Les échantillons « CH » et « O » montrent la présence de kaolinite ($Al_2H_4O_9Si_2$). La kaolinite a été observée dans les échantillons de sols mauritaniens étudiés par Küster et al. (2021) [27], provenant des régions de Néma (sud-est de la Mauritanie), Hassi Abyad (centre-sud de la Mauritanie) et Kaédi (sud-ouest de la Mauritanie) et Ely (2010) [26]. L'échantillon « O » présente une faible portion d'hématite (Fe_2O_3). Cette présence d'hématite peut être à l'origine de sa couleur rougeâtre.

De plus, une faible quantité de biotite est détectée dans l'échantillon « CH », tandis qu'une faible présence de périclase (MgO) est observée dans l'échantillon « S ».

Ces résultats ne concordent pas avec ceux de l'essai au bleu de méthylène et de la fraction argileuse, notamment pour le sol S. Cela peut être dû à l'hétérogénéité du sol.

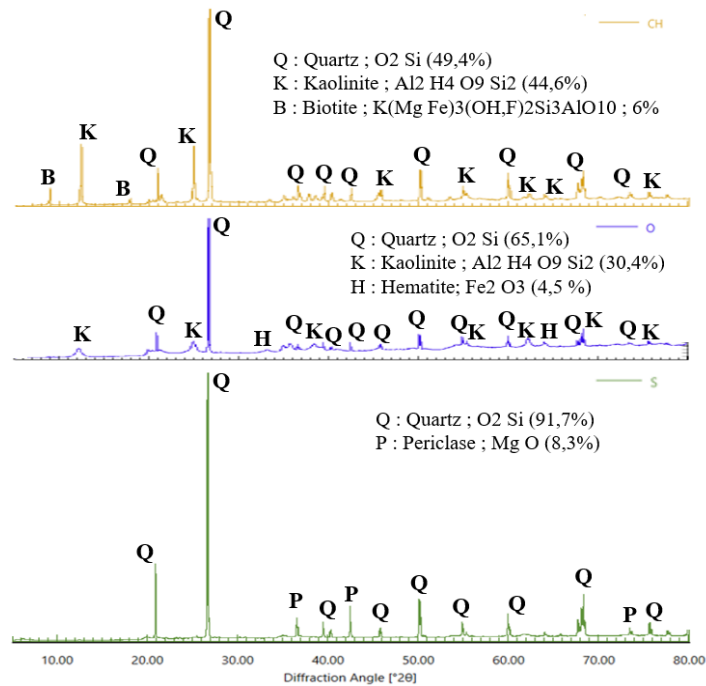


FIGURE 4. Diffractogrammes de Rayons X des sols.

C. Comportement thermographique

La figure 5 présente les thermogrammes des analyses différentielles et gravimétriques pour chaque échantillon des sols étudiés.

Chacun des thermogrammes montre un pic endothermique autour de 150 °C, indiquant l'élimination de l'eau contenue dans les feuillets. Un second pic endothermique, aux alentours de 300 °C, commun aux trois sols, mais beaucoup plus prononcé pour l'échantillon CH, peut correspondre à la décomposition de matières organiques ou à la déshydroxylation de la biotite.

Le troisième pic, autour de 500 °C, est lié à la déshydroxylation de la kaolinite ainsi qu'à la transformation endothermique du quartz α en quartz β. Un quatrième pic endothermique, unique au sol S, apparaît vers 700 °C et correspond à la déshydroxylation de la périclase.

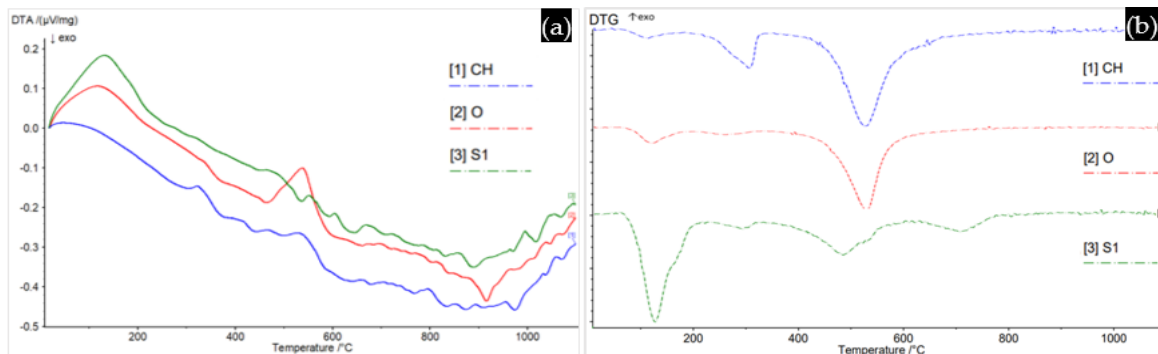


FIGURE 5. courbes ATD-ATG des échantillons a) ATD ; b) DTG.

D. pH des sols

Les valeurs de pH sont présentées dans le tableau 6 pour les trois sols étudiés.

Les trois sols présentent un pH légèrement alcalin, avec des valeurs respectives de (8,3 ; 7,4 ; 8,1) pour les sols (CH ; O ; S). Ce niveau de pH est favorable aux réactions entre le liant et le sol dans le cas des BTC stabilisés.

TABLEAU 6. Valeurs de pH mesurées pour les sols étudiés

Sol	Essai 1	Essai 2	Essai 3	pH
CH	8,27	8,28	8,29	8,3
O	7,43	7,44	7,44	7,4
S	8,13	8,15	8,14	8,1

E. Résistance à la compression

La figure 6 présente l'évolution de la résistance à la compression des différentes formulations.

Les BTC à base du sol (CH, O, S)Ref affichent des résistances à la compression les plus faibles, avec des valeurs respectives de 0,36 MPa, 0,33 MPa et 0,25 MPa. Pour le sol « S », la faible teneur en argile et l'absence de la kaolinite peut expliquer sa faible résistance par rapport aux autres échantillons.

Le mélange de 70% de sol avec 30% de sable semble améliorer légèrement les résistances avec des valeurs de 0,38 MPa, 0,40 MPa et 0,42 MPa respectivement. Un effet favorable de l'ajout de ciment est observé mais pas aussi significatif entre les proportions de 5 et 8%. Les valeurs sont de 2,22 MPa, 1,92 MPa et 1,25 MPa pour les BTC stabilisés avec 5 % de ciment (CH5c, O5c, S5c) et de 2,33 MPa, 2,04 MPa et 2,28 MPa pour ceux stabilisés avec 8 % de ciment (CH8c, O8c, S8c).

En ce qui concerne les BTC stabilisées avec 10 % de chaux (CH10ca, O10ca, S10ca), les résistances obtenues sont de 0,83 MPa, 1,48 MPa et 1,30 MPa respectivement. Pour les BTC stabilisés avec 12 % de chaux (CH12ca, O12ca, S12ca), les valeurs sont de 0,76 MPa, 1,71 MPa et 1,12 MPa.

On remarque que le sol « CH » présente les résistances les plus faibles lorsqu'il est stabilisé avec de la chaux, en comparaison avec les deux autres sols. Cela peut être dû à sa sensibilité à l'eau qui pourrait limiter la capacité du sol à former des liaisons solides. La durée de cure requise pour les échantillons stabilisés à la chaux, beaucoup plus longue, peut également influencer ces résultats.

Les résultats obtenus concordent avec ceux des recherches précédentes menées par (Malkanthi et al. ; 2020) [29] et (Ouedraogo et al. ; 2021) [30], où il a été démontré que la résistance à la compression des blocs de terre comprimée (BTC) stabilisés à la chaux est significativement inférieure à celle de leurs homologues stabilisés avec une proportion équivalente de ciment.

De manière synthétique, bien que certains mélanges présentent une amélioration notable de la résistance, aucun n'atteint le seuil de 4 MPa recommandé par la norme XP13-901[11]. Cela souligne la nécessité de recourir à des approches complémentaires — telles qu'une correction granulaire du mélange, un meilleur contrôle des conditions de cure ou l'ajout d'adjuvants — afin de développer des BTC conformes aux exigences normatives.

Par ailleurs, pour qu'une réaction pouzzolanique puisse se produire, le pourcentage d'argile doit être supérieur à 20 %, et la somme des teneurs en argile et en limon doit dépasser 35 % (Broms,

1991) [31]. Les faibles teneurs en argile observées dans nos trois sols suggèrent qu'il serait intéressant d'évaluer le gain en résistance induit par l'ajout de 20 % d'argile dans chaque formulation. Cette étude est actuellement en cours.

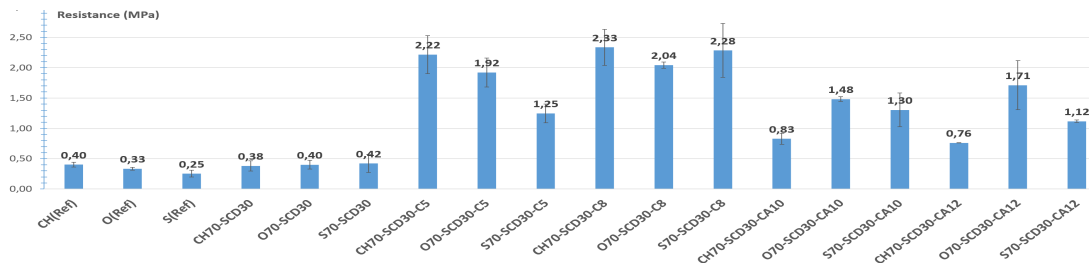


FIGURE 6. Résultats de la résistance à la compression.

IV. CONCLUSION

Dans cet article, nous avons étudié les propriétés mécaniques des argiles inexploitées de trois régions de la Mauritanie afin d'évaluer leur aptitude à la production de briques de terre comprimée.

La caractérisation effectuée a permis de classer les trois sols, qui sont tous des sols peu plastiques.

Les BTC fabriquées à partir de nos sols présentent des valeurs de résistance à la compression très faibles. Cela peut être dû au faible pourcentage d'argile dans nos échantillons.

Une diminution du pourcentage de sable pourrait être envisagée pour améliorer la résistance.

La stabilisation avec le ciment et la chaux a tout de même permis une augmentation considérable des résistances : environ 500 % avec le ciment et 300 % avec la chaux.

Cependant, les résistances obtenues restent inférieures à la valeur de 4 MPa recommandée par la norme XP P13-901 [11] pour la construction en terre. En perspective, Il serait pertinent de réaliser une étude avec différentes formulations corrigées sur le plan granulométrique, afin d'évaluer la résistance maximale que ces sols peuvent atteindre.

REFERENCES

[1] K.A.J. Ouedraogo, J.E. Aubert, C. Tribout, & G. Escadeillas. (2020). Is stabilization of earth bricks using low cement or lime contents relevant? *Constr. Build. Mater.* 236, 117578 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117578>

[2] G.E. Boukili, M. Lechheb, M. Ouakarrouch, A. Dekayir, F. Kifani-Sahban, A. Khaldoun. (2021). Mineralogical, physico-chemical and technological characterization of clay from Bensmim (Morocco): suitability for building application, *Constr. Build. Mater.* 280, 122300. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122300>

[3] ONS Mauritanie. (2014), En 2014, 31% des mauritaniens vivaient en dessous du seuil de pauvreté, et 16,6% en dessous du seuil d'extrême pauvreté selon l'ONS, disponible sur <https://ons.mr>

[4] ANSADE Mauritanie. (2021). Rapport statistique annuel, 2021 Disponible sur : <https://ansade.mr/fr/>

[5] A. HIBOUCHE. (2013). Sols traités aux liants Performances hydro-mécaniques et hygrothermiques - Applications en BTP, Thèse de Doctorat de l'université du Havre.

[6] S. Lahbabi, R. Bouferra, L. Saadi, & A. Khalil. (2023). Evaluation of the void index method on the mechanical and thermal properties of compressed earth blocks stabilized with bentonite clay. *Construction and Building Materials*, 393, 132114. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132114>

[7] S. NASSAR. (2024). Conception et caractérisation de blocs de terre comprimée à base de sédiments de dragage. *Academic Journal of Civil Engineering*, vol. 42, no 1, p. 960-969.

[8] M. Valenzuela, J. Leiva, A. Salas, G. Ciudad, J.P. Cárdenas, A. Oñate, & V. Tuninetti. (2023). CEBs with GRC: Fabrication, characterization, modeling, and correlation with microstructural fracture features. *Materials Today Communications*, 37. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.107028>

[9] U. Javed, R.A. Khushnood, S.A. Memon, F.E. Jalal & M.S. Zafar. (2020). Sustainable incorporation of lime-bentonite clay composite for production of ecofriendly bricks, *J. Clean. Prod.* 263, 121469, <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.121469>

[10] C. Turco, A.C. Paula Junior, E.R. Teixeira & R. Mateus. (2021). Optimisation of Compressed Earth Blocks (CEBs) using natural origin materials: A systematic literature review, *Constr. Build. Mater.*, 309, <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.125140>.

[11] AFNOR. (2022). Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons : définitions - Spécifications - Méthodes d'essais - Conditions de réception. XP P13-901.

[12] A. Bouazza, B. Labbaci, T. Rikioui. (2018). Effect of Dune Sand on the Compressive Strength of a Matrix Soil of Sandy-Clay-Gypsum. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 9(1), pp. 830-836, <http://iaeme.com/Home/issue/IJCIET?Volume=9&Issue=1>

[13] T. Eskisar. (2015). Influence of cement treatment on unconfined compressive strength and compressibility of lean clay with medium plasticity. *Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 40, No. 3, pp. 763-772, <https://doi.org/10.1007/s13369-015-1579-z>.

[14] G. Lees, M.O. Abdelkader, & S.K. Hamdani. (1982). Effect of clay fraction on some mechanical properties of lime-soil mixtures. *Highway Engineer*, Vol. 29, No. 11, pp. 3-9, [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(84\)91148-3](https://doi.org/10.1016/0148-9062(84)91148-3).

[15] B. Taallah (2014). Étude du comportement physico-mécanique du bloc de terre comprimée avec Fibres, Thèse de doctorat de l'Université Mohamed Khider Biskra.

[16] AFNOR. (2022). Sols, biodéchets traités et boues - Détermination du pH, NF EN ISO 10390.

[17] AFNOR. (2018). Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 4 : Détermination de la distribution granulométrie des particules, NF EN ISO 17892-4.

- [18] AFNOR (2018). Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 12 : détermination des limites de liquidité et de plasticité, NF EN ISO 17892-12.
- [19] AFNOR (2022). Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 9 : qualification des fines - Essais au bleu de méthylène, NF EN 933-9.
- [20] LCPC, SETRA. (1992). Guide des Terrassements Routiers, Réalisation des remblais et des couches de forme.
- [21] D. Lautrin. (1989). Essai au bleu de methylene-utilisation pratique des parametres derives de l'essai au bleu de methylene dans les projets de genie civil. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, (160).
- [22] S. Deboucha, & R. Hashim. (2011). A review on bricks and stabilized compressed earth blocks. *Scientific Research and Essays*, 6(3), 499-506, <https://doi.org/10.5897/SRE09.356>
- [23] M. Valenzuela, J. Leiva, A. Salas, G. Ciudad, J. P. Cárdenas, A. Oñate, ... & V. Tuninetti. (2023). CEBs with GRC: Fabrication, characterization, modeling, and correlation with microstructural fracture features. *Materials Today Communications*, 37, 107028.
- [24] AFNOR (2015). Méthodes d'essai des éléments de maçonnerie - Partie 1 : détermination de la résistance à la compression, NF EN 772-1+A1.
- [25] AFNOR (2014). Sols : reconnaissance et essais - Détermination des références de compactage d'un matériau - Essai Proctor Normal - Essai Proctor modifié, NF P94-093.
- [26] A. ELY. (2010). Synthèse et propriétés de biosorbants à base d'argiles encapsulées dans des alginates : application au traitement des eaux, Thèse de Doctorat de l'Université de Limoges.
- [27] D. Küster, S. Kaufhold, E. Limam, O. Jatlaoui, O. Ba, & A. Mohamed. (2021). Investigation of unexplored kaolin occurrences in southern Mauritania and preliminary assessment of possible applications. *Clay Minerals*, 56, 126–139, doi:10.1180/clm.2021.26.
- [28] G. El Boukili, S. Erba, F. Kifani-Sahban, & A. Khaldoun. (2023). Improving rheological and mechanical properties of non-plastic clay soil from Bensmim region (Morocco) using bentonite additions: Suitability for building application. *Journal of Building Engineering*, 63, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105525>.
- [29] S. N. Malkanthi, N. Balthazaar, & A. A. D. A. J. Perera. (2020). Lime stabilization for compressed stabilized earth blocks with reduced clay and silt. *Case Studies in Construction Materials*, 12, e00326, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00326>.
- [30] K. A. J. Ouedraogo, J. E. Aubert, C. Tribout, & G. Escadeillas. (2020). Is stabilization of earth bricks using low cement or lime contents relevant? *Construction and Building Materials*, 236, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117578>.
- [31] B. Broms. (1991) Stabilization of Soil with Lime Columns. *Foundation Engineering Handbook*, 2nd Edition, Ed. Hsai-Yang Fang Van Nostrand Reinhold, New York, pp. 833-855.