UTILISATION DE LA CHAUX VIVE COMME STABILISANT DURABLE CONTRE LA DÉGRADATION PLUVIALE DES BLOCS DE TERRE COMPRIMÉE AU TCHAD : CAS DE L'ARGILE DE GAOUI

Abdoulaye ADAM AHMAT[1], Moustapha OUSMANE[1], Abakar ALI[3], Batran SIDICK[4]

[1]Doctorant en géotechnique, Université de Trabzon, Turquie
[2]Doctorant en génie civil, Université de Moncton, Canada
[3]Professeur titulaire CAMES, École Nationale Supérieure des Travaux Publics (ENSTP), N'Djamena, Tchad
[4] Doctorant, Université de N'Djamena, Tchad
Auteurs correspondants : ahmatadamy21@gmail.com ; ousmanemoustapha@gmail.com

Résumé

La construction en terre reste répandue au Tchad, où le changement climatique intensifie les pluies extrêmes au Sahel (Chagnaud et al., 2022) et accélère la dégradation par l'eau de cet habitat. Le bloc de terre comprimée (BTC) offre une alternative locale au ciment importé, mais reste peu résistant sans stabilisation. Cette étude caractérise l'argile de Gaoui et évalue l'effet de la chaux vive, stabilisant, sur le comportement mécanique du BTC, comme mesure d'adaptation. Des essais d'identification ont précédé la confection de blocs de 29,5 × 15 × 8,5 cm par compactage statique à 2 MPa, avec des teneurs en chaux vive de 0 à 10 % de la masse, testés en flexion et en compression après 7, 14 et 30 jours de cure. Le matériau est classé argile très plastique (A4, NF P 11-300). L'ajout de chaux fait chuter l'indice de plasticité de 37,6 % à 12,0 % pour 10 % de chaux. La densité sèche maximale baisse de 1,50 à 1,31 t/m³ et la teneur en eau optimale passe de 16 % à 24 %. À 30 jours, la résistance à la compression atteint 3,91 MPa pour 10 % de chaux, contre 0,93 MPa pour le sol non traité, une hausse de 320 %. Dès 6 % de chaux et 30 jours de cure, la résistance dépasse le seuil de 2 MPa retenu par des normes pour les murs de remplissage. La chaux vive offre un levier local et durable pour un habitat plus résistant aux pluies intenses.

Mots clés : *Changement climatique ; Bloc de terre comprimée ; Argile de Gaoui ; Chaux vive ; Durabilité ; Résistance mécanique.*

FACING CLIMATE CHANGE: QUICKLIME AS A SUSTAINABLE STABILISER AGAINST RAINFALL-INDUCED DEGRADATION OF COMPRESSED EARTH BLOCKS IN CHAD — THE CASE OF GAOUI CLAY

Abstract

Raw earth construction remains widespread in Chad, where climate change is intensifying extreme rainfall in the Sahel (Chagnaud et al., 2022) and accelerating water-driven degradation of this housing. Compressed earth blocks (CEB) offer a local alternative to imported cement, but stay poorly resistant without stabilisation. This study characterises Gaoui clay and evaluates the effect of quicklime, a stabiliser, on the mechanical behaviour of the CEB, as an adaptation measure. Identification tests preceded the production of blocks of 29.5 × 15 × 8.5 cm by static compaction at 2 MPa, with quicklime contents of 0 to 10 % of the mass, tested in bending and compression after 7, 14 and 30 days of curing. The material is classified as a highly plastic clay (A4, NF P 11-300). Lime addition lowers the plasticity index from 37.6 % to 12.0 % at 10 % lime. Maximum dry density drops from 1.50 to 1.31 t/m³ while optimum water content rises from 16 % to 24 %. At 30 days, compressive strength reaches 3.91 MPa at 10 % lime, against 0.93 MPa for the untreated soil, a 320 % increase. From 6 % lime and 30 days of curing onward, strength exceeds the 2 MPa threshold set by standards for infill walls. Quicklime offers a durable, local lever for housing better able to withstand intense rainfall.

Key words: Climate change; Compressed earth block; Gaoui clay; Quicklime; Durability; Compressive strength.

Introduction

Le Sahel connaît depuis plus de trente ans une intensification des pluies extrêmes, tendance en partie attribuée au forçage climatique anthropique (Chagnaud et al., 2022). Cette évolution accroît l'exposition des constructions en terre crue à l'érosion et à la dégradation de surface par ruissellement, un phénomène déjà documenté sur des architectures en adobe soumises à des régimes de pluie changeants (Hart et al., 2021). Au Tchad, où la terre crue reste l'habitat le plus répandu, l'adaptation au changement climatique passe aussi par l'amélioration de la durabilité des matériaux de construction locaux.

La construction en terre crue abrite aujourd'hui plus d'un tiers de la population mondiale (Houben & Guillaud, 2006). Ce matériau, disponible sur place et facile à mettre en œuvre, procure une forte inertie thermique qui limite les écarts de température dans l'habitat, mais il a reculé dans les zones urbaines et les pays industrialisés au profit du béton et de l'acier.

Au Tchad, la flambée du prix du ciment importé pèse directement sur le coût du logement, dans un pays où l'accès à un habitat décent reste un problème pour une large partie de la population. La valorisation des matériaux locaux, et en particulier de la terre argileuse disponible en grande quantité autour de N'Djamena, constitue une piste concrète pour réduire ce coût et la dépendance aux importations.

Le bloc de terre comprimée (BTC) est une évolution du bloc d'adobe moulé, obtenue par compactage de la terre humide dans un moule métallique. Les premières presses manuelles datent des années 1950, avec l'invention de la CINVA-RAM par l'ingénieur colombien Raul Ramirez (Rigassi, 1995), suivie de presses mécaniques et motorisées à partir des années 1970. Le BTC a une forme régulière qui facilite la mise en œuvre, mais sa résistance mécanique et sa résistance à l'eau restent, à l'état brut, insuffisantes pour un usage porteur durable.

La stabilisation du matériau terre peut être mécanique, physique ou chimique (Winterkorn, 1975 ; United Nations, 1992). La stabilisation chimique à la chaux convient aux sols fins et plastiques, tandis que le ciment agit surtout sur les fractions sableuses et graveleuses (Houben & Guillaud, 2006). La chaux vive réagit avec l'argile en deux temps : un échange cationique et une floculation immédiate des particules, suivis d'une réaction pouzzolanique lente qui forme des hydrates cimentaires responsables du gain de résistance à moyen terme (Bell, 1996 ; Rao & Shivananda, 2005).

Les études disponibles sur la stabilisation à la chaux portent principalement sur des kaolinites (Kinuthia et al., 1999 ; Kavak & Baykal, 2012) et sur des argiles expansives d'Afrique du Nord ou d'Asie (Nalbantoglu, 2006 ; Guney et al., 2007), avec des dosages testés le plus souvent entre 2 et 10 % de la masse sèche, et des cures allant de quelques jours à plusieurs années. Elles s'accordent sur une baisse rapide de l'indice de plasticité et un gain de résistance qui se poursuit bien au-delà de 28 jours (Uppal & Chadda, 1967 ; Sakr et al., 2009). Aucune de ces études ne porte toutefois sur une argile sahélienne d'Afrique centrale, où le climat, la minéralogie et la disponibilité locale de la chaux diffèrent des contextes déjà documentés.

L'argile de Gaoui, extraite d'une carrière du quartier du même nom au nord-est de N'Djamena, est utilisée de longue date par les potiers locaux, mais elle n'a fait l'objet d'aucune caractérisation géotechnique publiée ni d'aucun essai de stabilisation à la chaux avant ce travail. Cette étude vise à

combler ce manque en (i) déterminant les propriétés physiques et la classification de l'argile de Gaoui, et (ii) évaluant l'effet de teneurs croissantes en chaux vive (0 à 10 % de la masse d'argile) et du temps de cure (7, 14 et 30 jours) sur la résistance en traction et en compression du BTC qui en est issu. Cette démarche s'inscrit dans une logique d'adaptation au changement climatique par le recours à un matériau de construction local et durable, plus à même de résister aux sollicitations mécaniques et hydriques accrues par des pluies plus intenses..

2. Matériels et méthodes

2.1. Site et matériaux

Le site d'étude se trouve au quartier de Gaoui, dans le 10e arrondissement de N'Djamena, à environ 10 km au nord-est du centre-ville (comprise entre 12° 10' 16,64" N et 12° 11' 6,13" N, et entre 15° 8' 28,40" E et 15° 9' 15,42" E). D'après les archives de la Direction générale de la météorologie (DGMN), N'Djamena connaît un climat sahélien à deux saisons : une saison sèche d'octobre à mai et une saison des pluies de juin à septembre. La pluviométrie annuelle varie de 500 à 700 mm et la température moyenne de 20 à 22,5 °C.

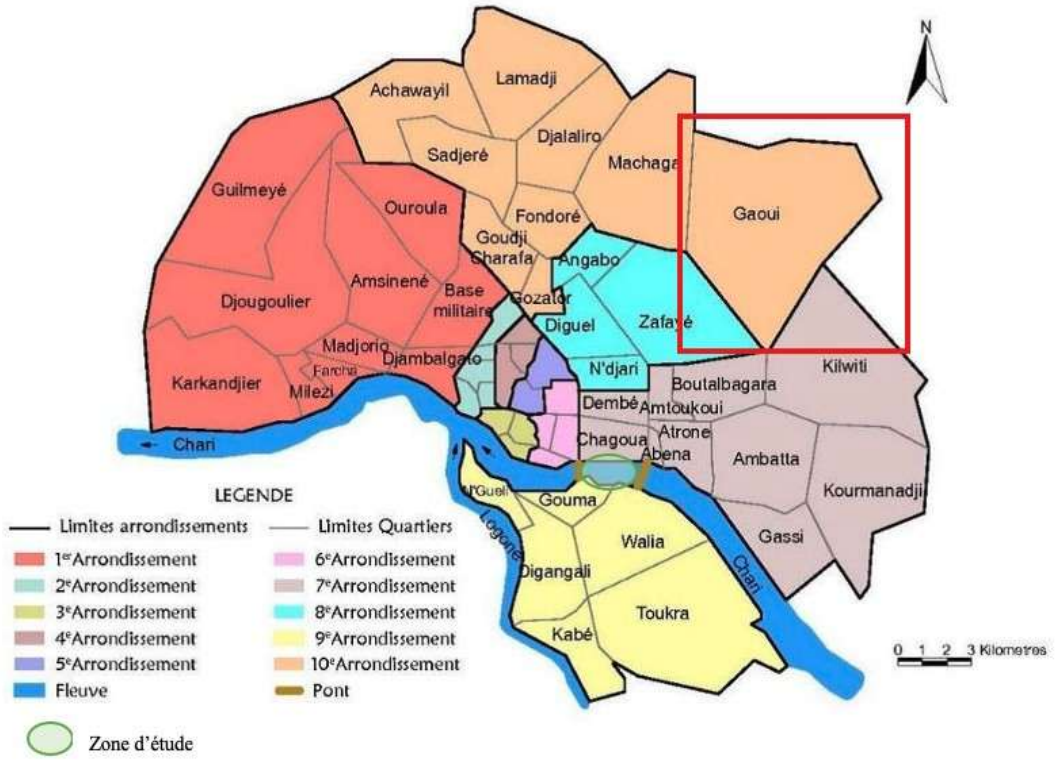


Figure 1 : Localisation de la carrière de Gaoui par rapport au centre-ville de N'Djamena.

L'argile a été prélevée dans la carrière de Gaoui et la chaux vive utilisée comme stabilisant. Les deux matériaux ont été tamisés avant mélange : passant au tamis de 5 mm pour l'argile et de 1,6 mm pour la chaux.

2.2. Essais d'identification

La teneur en eau naturelle a été déterminée par étuvage à 105 °C pendant 24 heures (NF P94-050, 1995). La masse volumique des grains solides a été mesurée au pycnomètre à eau sur cinq prises d'essai (NF P94-054, 1991). La distribution granulométrique a combiné un tamisage à sec pour les grains supérieurs à 80 µm (NF P94-056, 1996) et une sédimentométrie pour la fraction fine (NF P94-057, 1992). Les limites d'Atterberg — limite de liquidité à la coupelle de Casagrande (figure 2) et limite de plasticité au rouleau de 3 mm — ont été mesurées selon la NF P94-051 (1993), et l'indice de plasticité en a été déduit. La valeur au bleu de méthylène (VBS) a été obtenue par la méthode à la tache, sur la fraction inférieure à 5 mm, selon la NF P94-068 (1998). La classification du sol a ensuite été établie à l'aide du diagramme de Casagrande et de la classification NF P11-300 (1992) (Doat et al., 1979 ; Houben & Guillaud, 2006).

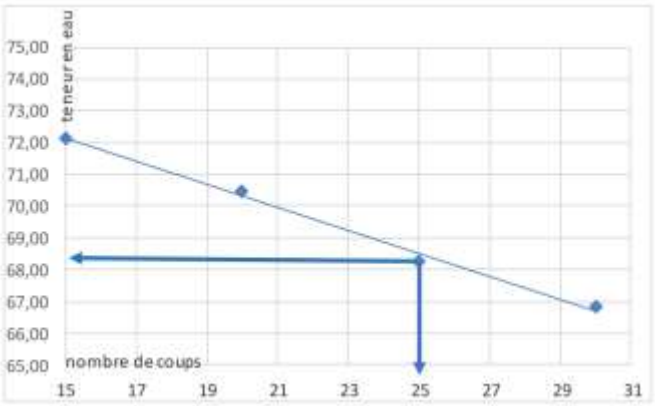


Figure 2 : Détermination graphique de la limite de liquidité (teneur en eau en fonction du nombre de coups à la coupelle de Casagrande)

2.3. Formulation et confection des blocs de terre comprimée

Six formulations ont été préparées, avec des teneurs en chaux vive de 0, 2, 4, 6, 8 et 10 % de la masse d'argile sèche (tableau 1). L'argile et la chaux ont d'abord été mélangées à sec, puis l'eau a été ajoutée progressivement.

Tableau I :

Formulation	100 % A	98 % A + 2 % C	96 % A + 4 % C	94 % A + 6 % C	92 % A + 8 % C	90 % A + 10 % C
Argile (g)	6000	5880	5760	5640	5520	5400
Chaux vive (%)	0	2	4	6	8	10

Tableau 1 : Formulations massiques des blocs de terre comprimée (A = argile, C = chaux vive).

La teneur en eau optimale de chaque formulation a été déterminée par compactage statique à la presse manuelle, selon la méthode proposée par le Centre de développement de l'entreprise (Chemani Halima et al., 2015), et non par l'essai Proctor dont l'énergie de compactage diffère de celle appliquée en presse

à BTC (Michot, 2008). Après un temps d'imprégnation d'une heure en sac plastique, le mélange a été compacté à une contrainte de 2 MPa dans un moule métallique donnant des blocs de 29,5 × 15 × 8,5 cm (planche 1). Les briques démoulées ont séché à l'air libre au laboratoire de l'ENSTP jusqu'à stabilisation de leur masse.



Planche Planche 1 : Confection des blocs de terre comprimée — a) pesée des matériaux ; b) compactage statique à la presse manuelle ; c) briques démoulées.

2.4. Essais mécaniques

La résistance en traction a d'abord été évaluée par un essai de flexion trois points (XP P13-901, 2001), qui fournit deux demi-blocs ensuite écrasés en compression uniaxiale à la presse CBR du laboratoire de l'ENSTP (photo 1). La contrainte de traction σt et la contrainte de compression σc ont été calculées par les relations (1) et (2) :

$$\sigma t = 3 \cdot Ft.max \cdot L / (2 \cdot b \cdot h) \quad (1)$$

$$\sigma c = Fr / S \quad (2)$$



Photo Photo 1 : Presse CBR du laboratoire de l'ENSTP utilisée pour l'essai de compression uniaxiale des demi-blocs.

Où FT.max est l'effort maximal de traction (N), Fr la force de rupture en compression (N), L la distance entre appuis (mm), b et h la largeur et la hauteur de l'éprouvette (mm), et S la section de l'éprouvette comprimée (mm^2). Chaque formulation a été testée à 7, 14 et 30 jours de cure, avec plusieurs éprouvettes par échéance, pour un total de 72 briques.

3. Résultats et discussion

3.1. Identification et classification de l'argile de Gaoui

La teneur en eau naturelle moyenne de l'argile est de 9,4 %, et la masse volumique des grains solides de 2 337 kg/m³ en moyenne (2 312 à 2 387 kg/m³ selon les prises d'essai). Plus de la moitié du matériau passe au tamis de 0,08 mm : la composition granulométrique est de 21 % de sable, 31 % de limon et 48 % d'argile (figure 3), ce qui en fait un matériau extrêmement fin.

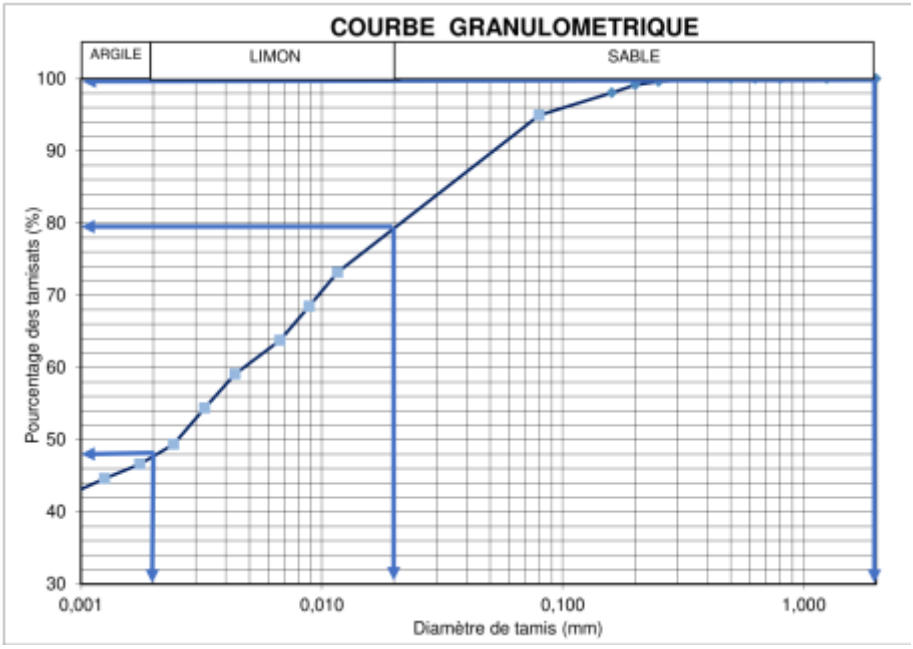


Figure 3 : Courbe granulométrique de l'argile de Gaoui (tamisage et sédimentométrie).

Les essais d'Atterberg donnent une limite de liquidité de 68,5 %, une limite de plasticité de 27,2 % et un indice de plasticité de 41,3 %. La valeur au bleu de méthylène atteint 13,5, très supérieure au seuil de 8 qui sépare les sols argileux des sols très argileux (NF P11-300). Le diagramme de Casagrande (figure 4) situe le point représentatif du matériau bien au-dessus de la ligne A, dans le domaine des argiles très plastiques ; la classification NF P11-300 confirme ce résultat et range l'argile de Gaoui dans la classe A4. Un sol de cette classe présente une sensibilité à l'eau et une plasticité trop élevée pour un usage direct en BTC, ce qui justifie le recours à une stabilisation.

Tableau II : Propriétés physiques et classification de l'argile de Gaoui à l'état naturel (essai ponctuel de contrôle, distinct de la série à six dosages présentés en §3.2).

Paramètre	W (%)	ϱs (kg/m³)	WL (%)	WP (%)	IP (%)	VBS	Classe NF P11-300
Argile de Gaoui (0 % chaux)	9,4	2337	68,5	27,2	41,3	13,5	A4

Tableau 2 : Propriétés physiques et classification de l'argile de Gaoui à l'état naturel (essai ponctuel de contrôle, distinct de la série à six dosages présentée en §3.2).

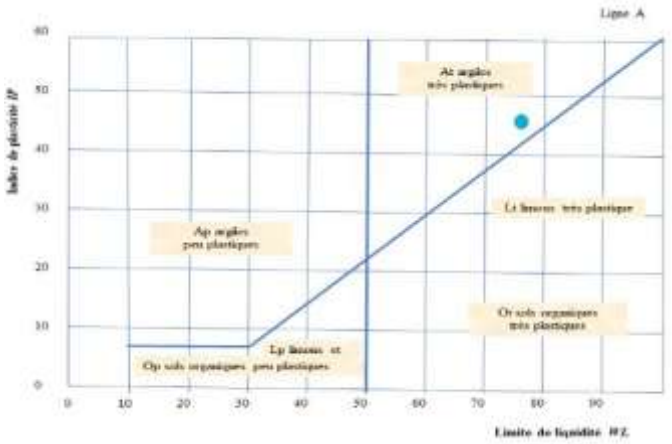


Figure 4 : Position de l'argile de Gaoui sur le diagramme de Casagrande (point bleu) — classe A4, argile très plastique.

3.2. Effet de la chaux sur les limites d'Atterberg et la valeur au bleu de méthylène

La figure 5 montre l'évolution des limites d'Atterberg mesurées sur la série des six formulations, avec la teneur en chaux. La limite de liquidité augmente peu, de 68,5 % à un maximum voisin de 77 % autour de 6 % de chaux, puis se stabilise. La limite de plasticité, elle, progresse fortement, de 32,9 % à 64,7 % pour 10 % de chaux. Il en résulte une chute continue de l'indice de plasticité, de 37,6 % à 12,0 %, soit une réduction de 68 % sur la plage testée. Cette évolution correspond à celle rapportée par Bell (1996) et par Kinuthia et al. (1999) sur des kaolinites, et par Nalbantoglu (2006) sur une argile expansive : la chaux libère des ions calcium qui provoquent un échange cationique et une floculation immédiate des particules d'argile, ce qui augmente la limite de plasticité et réduit la plasticité effective du matériau (Guney et al., 2007). Cette baisse de l'indice de plasticité traduit une meilleure maniabilité du sol traité, utile lors du compactage des briques.

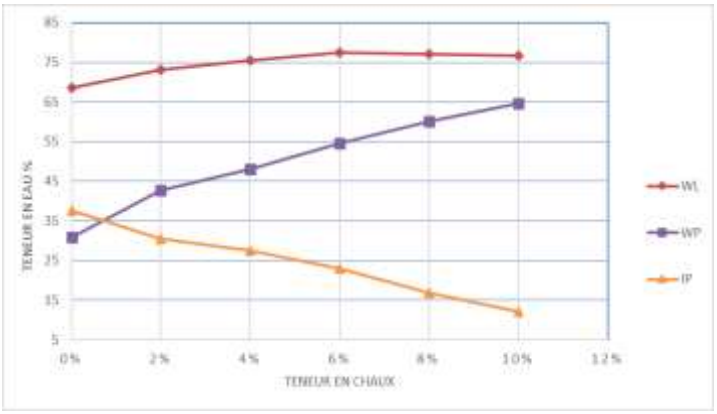


Figure 5 : Évolution des limites d'Atterberg (WL, WP, IP) en fonction de la teneur en chaux vive.

Le tableau 3 montre que la valeur au bleu de méthylène diminue régulièrement, de 13,5 pour le sol non traité à 3,7 pour 10 % de chaux. Cette baisse reflète la réduction de la surface spécifique de l'argile : les hydrates formés par la réaction pouzzolanique se déposent à la surface des particules et réduisent leur capacité d'adsorption d'eau.

Tableau III : Valeur au bleu de méthylène (VBS) en fonction de la teneur en chaux vive

Chaux (%)	0	2	4	6	8	10
VBS	13,53	11,21	10,09	7,32	6,09	3,72

.

3.3. Effet de la chaux sur les paramètres de compactage

La figure 6 présente les courbes de compactage statique obtenues pour chaque formulation. L'ajout de chaux étale la courbe et déplace son sommet vers des teneurs en eau plus élevées et des densités plus faibles, un déplacement qui s'accentue progressivement de 2 à 10 % de chaux.

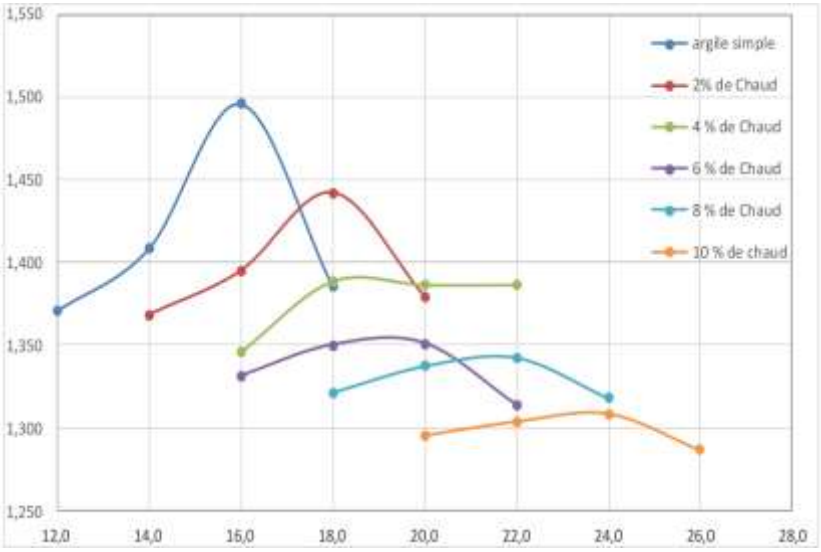


Figure 6 : Courbes de compactage statique (masse volumique sèche en fonction de la teneur en eau) pour les six formulations

L'ajout de chaux modifie nettement les courbes de compactage statique : la densité sèche maximale diminue de 1,50 t/m³ pour l'argile non traitée à 1,31 t/m³ pour 10 % de chaux, tandis que la teneur en eau optimale passe de 16 % à 24 % sur la même plage (figure 7). Cette tendance est cohérente avec les observations de Bell (1996) et de Rao & Shivananda (2005) : la floculation des particules d'argile crée une structure plus ouverte, moins dense, qui retient davantage d'eau, et l'eau supplémentaire nécessaire à la réaction pouzzolanique augmente la teneur en eau optimale. Une densité sèche plus faible n'est pas défavorable en soi pour un BTC : elle s'accompagne généralement d'une plage de teneur en eau de compactage plus large sur chantier, donc d'une mise en œuvre plus tolérante aux variations d'humidité de l'argile.

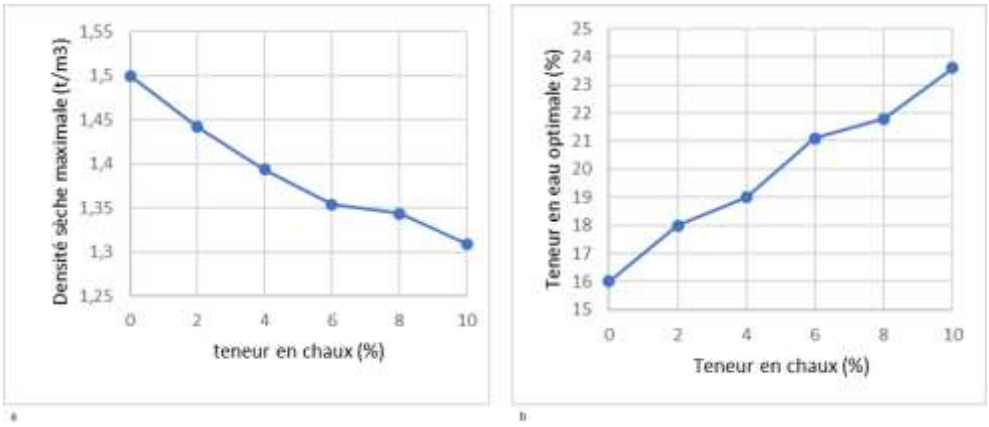


Figure 7 : Variation de la densité sèche maximale (a) et de la teneur en eau optimale (b) en fonction de la teneur en chaux vive

Le suivi de la masse des briques pendant le séchage (figure 8) montre une perte d'eau rapide durant les douze premiers jours, quelle que soit la formulation, suivie d'une stabilisation progressive au-delà de 21 jours. Les briques les plus chargées en chaux restent systématiquement plus lourdes à masse égale d'argile, ce qui traduit la teneur en eau de compactage plus élevée nécessaire à ces formulations.

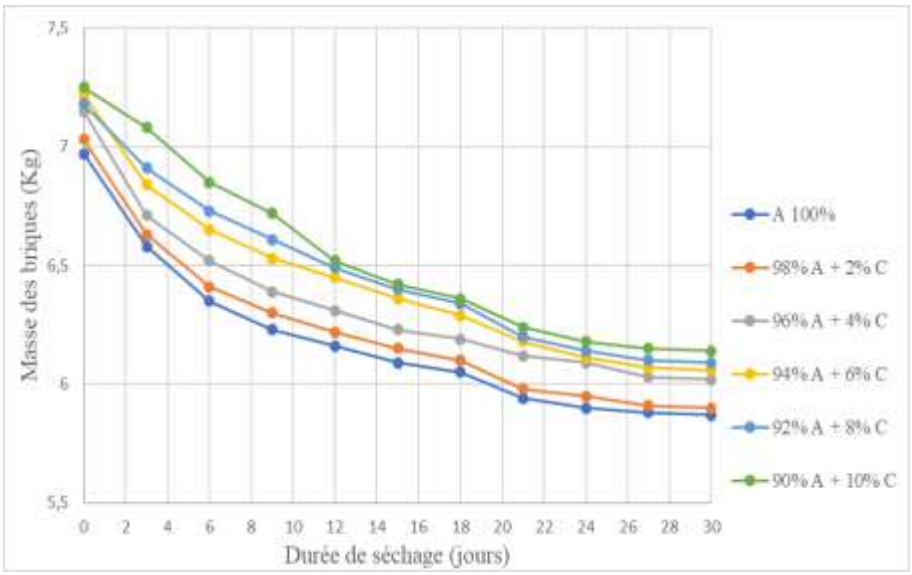


Figure 8 : Cinétique de séchage à l'air libre des blocs de terre comprimée pour les six formulations

3.4. Résistance mécanique

Le tableau 4 récapitule les résistances en traction et en compression mesurées pour chaque formulation et chaque échéance de cure. La résistance en traction du sol non traité reste très faible et progresse peu avec le temps de cure : 0,006 MPa à 7 jours, 0,055 MPa à 30 jours. L'ajout de chaux améliore cette résistance à toutes les échéances : à 30 jours, elle atteint 0,146 MPa pour 10 % de chaux, soit une hausse de 166 % par rapport au sol non traité à la même échéance.

Tableau 4 : Résistances moyennes à la traction (Rt) et à la compression (Rc) selon la formulation et la durée de cure — six formulations complètes.

Formulation	Cure (j)	Rt moy (MPa)	Rc moy (MPa)
100 % A	7	0,006	0,10
100 % A	14	0,022	0,61
100 % A	30	0,055	0,93
98 % A + 2 % C	7	0,008	0,21
98 % A + 2 % C	14	0,026	0,75
98 % A + 2 % C	30	0,065	1,31
96 % A + 4 % C	7	0,011	0,32
96 % A + 4 % C	14	0,030	0,86
96 % A + 4 % C	30	0,076	1,98
94 % A + 6 % C	7	0,016	0,44
94 % A + 6 % C	14	0,033	0,96
94 % A + 6 % C	30	0,116	2,26
92 % A + 8 % C	7	0,021	0,53
92 % A + 8 % C	14	0,037	1,06
92 % A + 8 % C	30	0,125	3,05
90 % A + 10 % C	7	0,027	0,65
90 % A + 10 % C	14	0,041	1,17
90 % A + 10 % C	30	0,146	3,91

La résistance à la compression suit la même tendance, avec des gains plus marqués (figure 9). À 30 jours, elle passe de 0,93 MPa pour le sol non traité à 3,91 MPa pour 10 % de chaux, soit une augmentation de 320 %. Le gain reste modeste à 7 et 14 jours — la résistance à 10 % de chaux n'atteint que 0,65 MPa et 1,17 MPa respectivement — avant de s'accélérer nettement entre 14 et 30 jours. Cette cinétique correspond à la distinction classique entre réactions à court terme, échange cationique et floculation, responsables du gain rapide mais limité à 7 et 14 jours, et réaction pouzzolanique à long terme, plus lente, qui forme les hydrates cimentaires à l'origine du gain principal de résistance (Uppal & Chadda, 1967 ; Kavak & Baykal, 2012).

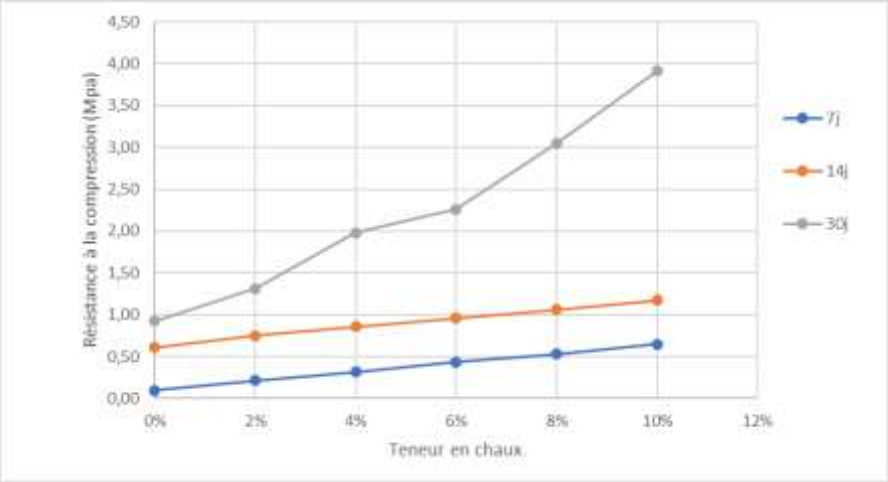


Figure 9 : Résistance à la compression en fonction de la teneur en chaux vive, pour des cures de 7, 14 et 30 jours

Sur le plan chimique, la portlandite Ca(OH)2 libérées par la chaux vive se dissocie en ions Ca2+ et OH-, qui élèvent le pH de la solution interstitielle au-delà de 12,4 et solubilisent la silice et l'alumine des feuillets argileux. Ces espèces dissoutes réagissent avec le calcium pour former des silicates de calcium hydratés (C-S-H) et des aluminates de calcium hydratés (C-A-H), homologues aux hydrates du ciment, qui cimentent les grains entre eux et comblent une partie de la porosité (Bell, 1996 ; Rao & Shivananda, 2005). Millogo et al. (2008) rapportent le même mécanisme sur des briques d'adobe en argile kaolinitique stabilisée à la chaux : la résistance en compression y est multipliée par un facteur comparable à celui observé ici, avec la même accélération du gain de résistance au-delà de 14 jours. Le gain de résistance mesuré sur l'argile de Gaoui, matériau très plastique et riche en argile (48 %), est cohérent avec l'importance de la fraction argileuse disponible pour la réaction pouzzolanique : plus la surface argileuse réactive est grande, plus la quantité d'hydrates formés est importante, et plus le gain de résistance est élevé.

Tableau 5 : Résistance minimale en compression admissible pour les BTC selon différentes normes nationales.

Pays / norme	Inde IS-1725	Brésil NBR	Afrique du Sud ARSO	Tunisie NT	France XP P13-901	Colombie NTC 5324	Espagne UNE 41410	Nouvelle-Zélande NZS
Rc min. (MPa)	2	2	2	2	2	2	1,5	3,5

Le tableau 5 compare ces résultats aux seuils de résistance en compression retenus par plusieurs normes nationales pour les BTC. Dès 4 % de chaux et 30 jours de cure, la résistance obtenue (1,98 MPa) avoisine le seuil de 2 MPa fixé par l'Inde, le Brésil, l'Afrique du Sud, la Tunisie, la France et la Colombie ; à partir de 6 % de chaux (2,26 MPa), ce seuil est dépassé, de même que celui de l'Espagne (1,5 MPa). Le seuil plus exigeant de la Nouvelle-Zélande (3,5 MPa) n'est atteint qu'à 10 % de chaux et 30 jours de cure. Un dosage de 4 à 6 % de chaux vive, associé à une cure de 30 jours, suffit donc à rendre l'argile

de Gaoui apte à la fabrication de blocs destinés à des murs de remplissage non porteurs, au regard de la majorité des référentiels internationaux consultés.

Cette étude ne couvre pas le comportement du matériau face à des cycles d'humidification-séchage ni son retrait au séchage, deux paramètres qui conditionnent la durabilité d'un mur en BTC exposé aux pluies sahéliennes. L'évaluation retenue ici porte sur la résistance mécanique à l'état sec, en cohérence avec les normes citées ; un usage en élévation extérieure devrait être précédé d'essais de durabilité à l'eau, en particulier pour les dosages en chaux les plus faibles.

4. Conclusion

Cette étude a caractérisé pour la première fois l'argile de Gaoui et évalué l'effet de la chaux vive sur le comportement mécanique du bloc de terre comprimée qui en est fabriqué. Le matériau brut est une argile très plastique de classe A4, avec un indice de plasticité de 41,3 % et une valeur au bleu de méthylène de 13,5, impropre en l'état à un usage de construction durable.

L'ajout de chaux vive réduit l'indice de plasticité de 68 % et la valeur au bleu de méthylène de 73 % pour un dosage de 10 %. La résistance à la compression à 30 jours passe de 0,93 MPa à 3,91 MPa sur la même plage de dosage, une hausse de 320 % portée principalement par la réaction pouzzolanique entre 14 et 30 jours de cure. Un dosage de 4 à 6 % de chaux vive, associé à une cure de 30 jours, rapproche ou dépasse le seuil de résistance en compression retenu par la plupart des normes nationales consultées pour les BTC de remplissage.

Ces résultats fournissent une première référence géotechnique pour la filière de construction en terre à N'Djamena et confirment l'intérêt de la chaux vive, disponible localement, comme stabilisant à faible coût pour l'argile de Gaoui. Ils devront être complétés par des essais de durabilité à l'eau, de retrait au séchage et, à terme, par des essais sur murs à l'échelle réelle avant toute prescription pour un usage en élévation extérieure.

Dans un contexte de pluies plus intenses au Sahel, la stabilisation à la chaux vive constitue une mesure d'adaptation accessible pour prolonger la durée de vie de l'habitat en terre crue au Tchad, sans recourir à un liant importé.

Bibliographie

AFNOR, 1991, NF P94-054 — Sols : reconnaissance et essais. Détermination de la masse volumique des particules solides. Association française de normalisation, Paris.

AFNOR, 1992, NF P94-057 — Sols : reconnaissance et essais. Analyse granulométrique des sols. Méthode par sédimentation. Association française de normalisation, Paris.

AFNOR, 1992, NF P11-300 — Exécution des terrassements. Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières. Association française de normalisation, Paris.

AFNOR, 1993, NF P94-051 — Sols : reconnaissance et essais. Détermination des limites d'Atterberg. Association française de normalisation, Paris.

AFNOR, 1995, NF P94-050 — Sols : reconnaissance et essais. Détermination de la teneur en eau pondérale. Association française de normalisation, Paris.

AFNOR, 1996, NF P94-056 — Sols : reconnaissance et essais. Analyse granulométrique. Méthode par tamisage à sec après lavage. Association française de normalisation, Paris.

AFNOR, 1998, NF P94-068 — Sols : reconnaissance et essais. Mesure de la capacité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol. Association française de normalisation, Paris.

AFNOR, 2001, XP P13-901 — Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons. Définitions, spécifications, méthodes d'essai, conditions de réception. Association française de normalisation, Paris.

BELL F.G., 1996, « Lime stabilization of clay minerals and soils ». Engineering Geology, vol. 42, n°4, p. 223-237.

CHAGNAUD G., PANTHOU G., VISCHEL T. & LEBEL T., 2022, « A synthetic view of rainfall intensification in the West African Sahel ». Environmental Research Letters, vol. 17, n°4.

CHEMANI HALIMA B., CHEMANI H. & ALOULOU F., 2015, Comportement des matériaux argileux traités à la chaux : caractérisation et méthode de compactage statique. Centre de développement de l'entreprise (CDE).

DOAT P., HAYS A., HOUBEN H., MATUK S. & VITOUX F., 1979, Construire en terre. Éditions Alternatives et Parallèles, Paris, 265 p.

GUNEY Y., SARI D., CETIN M. & TUNCAN M., 2007, « Impact of cyclic wetting-drying on swelling behavior of lime-stabilized soil ». Building and Environment, vol. 42, n°2, p. 681-688.

HART S., RAYMOND K., WILLIAMS C.J. & GUEBARD M.C., 2021, « Precipitation impacts on earthen architecture for better implementation of cultural resource management in the US Southwest ». Heritage Science, vol. 9, article 143.

HOUBEN H. & GUILLAUD H., 2006, Traité de construction en terre. Éditions Parenthèses, CRATerre, Marseille, 355 p.

KAVAK A. & BAYKAL G., 2012, « Long-term behavior of lime-stabilized kaolinite clay ». Environmental Earth Sciences, vol. 66, p. 1943-1955.

KINUTHIA J.M., WILD S. & JONES G.I., 1999, « Effects of monovalent and divalent metal sulphates on consistency and compaction of lime-stabilised kaolinite ». Applied Clay Science, vol. 14, n°1-3, p. 27-45.

MICHOT A., 2008, Caractéristiques thermophysiques de matériaux à base d'argile : évolution avec des traitements thermiques jusqu'à 1400 °C. Thèse de doctorat, Université de Limoges, 116 p.

MILLOGO Y., HAJJAJI M. & OUEDRAOGO R., 2008, « Microstructure and physical properties of lime-clayey adobe bricks ». Construction and Building Materials, vol. 22, n°12, p. 2386-2392.

NALBANTOGLU Z., 2006, « Lime stabilization of expansive clay ». In Expansive Soils: Recent Advances in Characterization and Treatment. Taylor & Francis, Londres.

RAO S.M. & SHIVANANDA P., 2005, « Compressibility behaviour of lime-stabilized clay ». Geotechnical and Geological Engineering, vol. 23, p. 309-319.

RIGASSI V., 1995, Blocs de terre comprimée, volume I : manuel de production. CRATerre-EAG, Friedrich Vieweg & Sohn, Braunschweig, 104 p.

SAKR M.A., SHAHIN M.A. & METWALLY Y.M., 2009, « Utilization of lime for stabilizing soft clay soil of high organic content ». Geotechnical and Geological Engineering, vol. 27, p. 105-113.

UNITED NATIONS CENTRE FOR HUMAN SETTLEMENTS, 1992, Earth Construction Technology. Nairobi, Kenya, 200 p.

UPPAL H.L. & CHADDA L.R., 1967, « Physico-chemical changes in the lime stabilization of black cotton soil (India) ». Engineering Geology, vol. 2, p. 179-189.

WINTERKORN H., 1975, « Soil stabilization ». Chapitre 8 in Foundation Engineering Handbook, Winterkorn, H.F. & Fang, H.-Y. (éd.), Van Nostrand Reinhold Company, 750 p.