

Durabilité du traitement d'une argile gonflante (Karal) par ajout de chaux et de sable

Durability of the treatment of an expansive clay (Karal) by lime/sand addition

Lemankreo BAKAIYANG^{1*}, Myriam DUC³, Yasmina BOUSSAFIR³,
Fabien SZYMKIEWICZ³, Jérémie MADJADOUMBAYE²

¹ Université de Yaoundé I, Institut Universitaire de Technologie du bois, Mbalmayo, Cameroun

² Université de Yaoundé I, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique, Yaoundé, Cameroun

³ GERS-SRO, Université Gustave Eiffel, 77447 Marne-la-Vallée, France

*bakaiyangl@yahoo.com

RESUME : La problématique des argiles gonflantes de type Karal rencontrées dans les régions septentrionales du Cameroun intéresse depuis de nombreuses années des chercheurs du monde entier en raison de leurs mouvements de retrait-gonflement qui sont à l'origine des fissures observées sur les bâtiments, les routes et les barrages en terre. La construction des routes sur le Karal représente un défi majeur au regard de sa faible portance (CBR=0,66) et de son gonflement élevé (entre 8 et 9%). Des études antérieures ont montré une amélioration des propriétés de ce sol gonflant contenant des argiles montmorillonitiques, après un traitement mixte avec de la chaux et du ciment. Cependant, le ciment demeure un matériau à fort impact environnemental (émissions élevées du CO₂) et onéreux compte tenu de la rareté de la matière première (le clinker) qui est souvent importée. Face à ces contraintes, une solution alternative est proposée sous la forme d'un traitement mixte avec des combinaisons de chaux éteinte (rarement utilisée en Europe) et de sable (abondant et peu cher voire encombrant s'il n'est pas valorisé). Les résultats des tests avec un traitement de type chaux éteinte (3% ou 5%) avec du sable (35%, 50% ou 65%) ont montré une amélioration de la portance du sol de 0,66 à 134, et une réduction de l'indice de plasticité (de 31,1 à 8,4) compte tenu d'un effet de dilution et d'un effet chimique, ainsi qu'une réduction du gonflement linéaire (de 8,06% à 0,03%). Le test de durabilité basé sur l'application de cycles d'humidification/séchage selon un protocole propre au contexte local, a permis de montrer qu'il est possible d'utiliser les sols Karal traités, en couche de chaussées, sous réserve de respecter certaines dispositions constructives. Cette pratique de traitement mixte trop peu répandue encore permettrait de réduire à terme considérablement le coût des travaux routiers au Cameroun.

ABSTRACT: The problem of Karal type swelling clays found in the northern regions of Cameroon has been interested researchers worldwide in recent years due to their shrink-swell movements, which cause cracks observed in buildings, roads, and earthen dams. Road Construction on Karal soil presents a major challenge given its low bearing capacity (CBR=0.66) and high swelling (between 8 and 9%). Previous studies have shown an improvement in the properties of this swelling soil containing montmorillonite clays after mixed treatment with lime and cement. However, cement remains a material with a high environmental impact (high CO₂ emissions) and is expensive due to the scarcity of the raw material (clinker), which is often imported. Faced with these constraints, an alternative solution is proposed in the form of a mixed treatment combining hydrated lime (rarely used in Europe) and sand (abundant and inexpensive, even bulky if not utilized). Test results with a hydrated lime treatment (3% or 5%) with sand (35%, 50% or 65%) showed an improvement in soil bearing capacity from 0.66 to 134, and a reduction in the plasticity index (from 31.1 to 8.4) due to dilution and chemical effects, as well as a reduction in linear swelling (from 8.06% to 0.03%). The durability test, based on the application of wetting/drying cycles according to a protocol specific to the local context, demonstrated that treated Karal soils can be used sustainably as road surfaces, provided certain construction requirements are met. This mixed treatment practice, which is still too unusual, would allow for a considerable reduction of the cost of the public works in Cameroon.

Mots-clés: Argile gonflante ; Karal ; Traitement ; Chaux éteinte ; Sable ; Durabilité.

1 INTRODUCTION

Les argiles gonflantes caractérisées par le phénomène de retrait-gonflement sont connues comme étant les principales causes de

dégradations des ouvrages du génie civil dans les zones où elles sont présentes (Bakaiyang, 2022). Elles sont abondantes en zones arides et semi-arides selon Chen (1988) et entraînent une faible

portance des sols support de fondation. En Afrique, elles représentent 10% des sols africains (Magnan, 2013). Elles sont connues sous des noms locaux tels que « tirs » au Maroc, « black cotton soils » au Nigeria ou « regurs » en Inde, « sols margalithiques » indonésiens ou encore « karal » au Cameroun.

S'agissant du Karal, c'est une argile gonflante qui est présente spécifiquement dans les régions du Nord et de l'Extrême-Nord Cameroun, avec un comportement spécifique du fait de sa difficulté à être maniée facilement. En effet, en saison pluvieuse, le Karal absorbe beaucoup d'eau et gonfle, alors qu'en saison sèche le départ de l'eau entraîne une très grande perte de portance (Bakaiyang, 2014). Le comportement de ce type de sol a déjà été exploré ces dernières années par plusieurs chercheurs (Livet, 1988 ; Ngale et al, 2014 ; Baana et al, 2015 ; Baana, 2020 ; Temga et al, 2017 ; Temga et al, 2018 ; Limaleba et al, 2016 ; Bakaiyang et al, 2021 ; Bakaiyang, 2022, Bakaiyang et al, 2024). Les résultats de la littérature montrent que le Karal est une argile gonflante qui présente un gonflement important, une plasticité importante et une portance faible. Pour améliorer ces propriétés, la solution du traitement à la chaux au ciment ou même avec un mélange des deux a été proposée.

Une amélioration des propriétés du Karal gonflant contenant des argiles montmorillonitiques, après un traitement mixte avec de la chaux et du ciment a été démontrée dans l'étude de Bakaiyang et al. (2021) et Bakaiyang (2022). Cependant, le ciment demeure un matériau à fort impact environnemental et onéreux souvent importée depuis l'étranger vers le Cameroun. Face à ces contraintes, une solution alternative est proposée sous la forme d'un traitement mixte avec des combinaisons de chaux éteinte et de sable, tous deux disponibles et peu utilisés dans le traitement des sols au Cameroun. Le sable est un matériau abondant dans les régions de l'Extrême-Nord et du Nord Cameroun. Il se trouve dans la région Nord des « mayos » (nom donné aux cours d'eau dans la partie septentrionale du Cameroun), ce qui rend la construction moins chère dans cette région, comparée au grand sud du Cameroun. Aussi l'idée d'exploiter le sable en technique routière en vue d'améliorer les performances mécaniques des couches d'assises s'avère intéressante du point de vue économique mais également environnemental. En effet le sable non exploité constitue généralement une gêne environnementale (par manque de place où le déposer) et une perte

compte tenu du fait que cette matière première reste non utilisée.

Cet article a donc pour objectif de démontrer qu'il est possible de valoriser les sols Karal en construction routière après un traitement mixte utilisant la chaux éteinte et le sable.

2 MATERIAUX ET METHODES

2.1 Origine du sol testé

Le matériau étudié est un sol Karal provenant de Pitoa, localité située dans la région du Nord Cameroun, non loin de la route nationale N°1. Le site de prélèvement dont les coordonnées sont N9°22'31.4'' et E13°28'25.2'', est situé sur une plaine, reconnue comme propice à la formation des argiles. Du point de vue minéralogique, le Karal prélevé est constitué majoritairement de quartz (19%) et d'argile de type montmorillonite (15,5%), illite/muscovite (5,5%) et kaolinite (20,5%) (Bakaiyang et al, 2024). La chaux éteinte utilisée pour le traitement provient de l'usine ROCA située à Figuil alors que le sable a été prélevé dans la rivière Soulongo.

2.2 Méthodes utilisées

Les essais ont été réalisés conformément aux normes françaises et ont permis de procéder à la caractérisation géotechnique, minéralogique et chimique du Karal prélevé. Les résultats obtenus ont été consignés dans le tableau 1.

Tableau 1. Caractéristiques géotechniques et physiques du sol Karal

Normes	Paramètres	Résultats
NF P 94-051	Limite de liquidité LL	67,1
	Limite de plasticité LP	36
	Indice de plasticité IP	31,1
NF EN ISO 17892-4	% Grave (> 2 mm)	0,1 %
	% Sable (63µm - 2 mm)	6%
	% Limon (2 - 63 µm)	52%
	% Argile (< 2 µm)	41,9%
NF P 94-068	Vbs	7,2 g/100g
NFX31-130	Capacité d'échange cationique CEC	107 g/100g
NF P 94-050	Teneur en eau initiale w_i	8,4 %
--	pH	6,65
NF P 94-055	Teneur en matière organique (MO)	0,71 %
NF P 94 093 (Proctor modifié)	Teneur en eau optimale w_{OPM}	17 %
	Masse volumique sèche maximale $\rho_{d\ OPM}$	1,66 t /m ³
NF P 94 078	CBR	0,66
NF P11-300	Classification GTR	F3
	Classification HRB	A-7-6(19)

La teneur minimale en chaux a été déterminée en appliquant la formule empirique de Hill and Davidson (1960) suivante:

$$\%Min = \frac{\text{teneur en argile } (<2 \mu m)}{35} + 1,25 \quad (1)$$

Le pourcentage minimal de chaux étant fixé à 3%, deux teneurs en chaux éteinte ont été choisies soit 3 et 5% pour cette étude. La teneur en sable pour le traitement varie également entre 35 et 65%. Les combinaisons du Tableau 2 ont été testées dans la suite de la présente étude.

Tableau 2. Traitements chaux/sable appliqués au Karal.

Code Ech	Karal (%)	Chaux éteinte CE (%)	Sable S (%)
K	100	0	0
3%CE+35%S	62	3	35
3%CE+50%S	47	3	50
3%CE+65%S	32	3	65
5%CE+35%S	60	5	35
5%CE+50%S	45	5	50
5%CE+65%S	30	5	65

Les résistances à la compression des éprouvettes ont été mesurées après 7 jours suivant la norme NF EN 13286-41. Pour cette norme, les échantillons de sols ont été confectionnés et compactés dans des moules de 8×16 cm (élancement H/D = 2). Une presse hydraulique a été utilisée pour appliquer le compactage des éprouvettes. Après le démoulage, les différentes éprouvettes ont été enveloppées à l'aide d'un film plastique puis conservées fermées hermétiquement afin de favoriser la prise et leur durcissement, sous les conditions ambiantes d'humidité et de température d'une salle réglée à 20 ± 2°C. La cure a été imposée avant immersion dans l'eau. Ces éprouvettes ont servi à la mesure de la résistance à la compression à 7 j (3j à l'air+4j immergé dans l'eau).

Pour ce qui est de la durabilité, un protocole basé sur des cycles d'humidification/séchage propre aux sols Karal a été mis en place. Ce protocole prend en compte la variabilité du climat dans la zone d'étude au Nord/Extrême- Nord du Cameroun. En effet, les éprouvettes traitées qui ont été compactées dans des moules de 8×16 cm ont préalablement subi un temps de cure de 90 jours. Pendant ce temps, les éprouvettes ont été emballées dans un film plastique, puis déposées dans un sac hermétique. À la fin des 90 j de cure,

les éprouvettes ont été soumises aux cycles constitués d'un séchage suivi d'une humidification. Ces cycles tentent de reproduire des cycles naturels avec des durées de séchage et d'humidification variables, basées sur les alternances des saisons sèches et humides au Nord Cameroun. Les éprouvettes sont séchées à l'air libre dans une salle réglée à la température de 20°C pendant un nombre de jours variable (4, 7 ou 10 j) selon les cycles (sans objectif de teneur en eau à atteindre). L'humidification par remontée capillaire est réalisée ensuite à T=20°C. Pour cela, les éprouvettes sont posées chacune sur une pierre poreuse avec un papier filtre entre les deux pour qu'il n'y ait pas contact direct pendant la phase d'humidification. Pour permettre la montée capillaire jusqu'au sommet de l'échantillon, chaque éprouvette est retournée une fois. La durée d'humidification a été fixée entre 2 et 8 j. Cette durée est nécessaire pour atteindre sensiblement la teneur en eau initiale du matériau (teneur en eau lors du prélèvement des sols) et cherche à reproduire l'humidification obtenue après une période de pluie en saison humide. Les cycles d'humidification-séchage ont duré au total cinq mois (soit 12 cycles), durée considérée comme la durée moyenne de la saison pluvieuse dans le Nord Cameroun.

Au cours des cycles, les paramètres suivants sont déterminés:

- L'amplitude de gonflement-retrait et la déformation volumique (mesure avec un pied à coulisse des dimensions des éprouvettes soit le diamètre D et la hauteur H. Des précautions ont été prises pour effectuer 3 mesures à chaque fois en haut, au milieu et en bas de l'éprouvette.
- La perte de masse de l'éprouvette : cela consiste à peser les éprouvettes après avoir laissé s'écouler l'eau libre. Cette perte de masse PM est donnée par la formule suivante :

$$PM (\%) = 100 \times (m_{90 \text{ jrs de cure}} - m_{\text{apr cycles}}) / m_{90 \text{ jrs de cure}} \quad (2)$$

- La résistance à la compression simple Rc est mesurée après 0 ou après 12 cycles.

3 RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1 Effet du traitement mixte chaux/sable sur les propriétés du Karal

La Figure 1 montre une réduction du gonflement linéaire des sols après traitement (passant de 8.6-9% à 0.04 à 0.5%). Le compactage à 10, 25 et 56 coups, permettent d'observer l'effet de l'énergie de compactage sur les propriétés du sol soit sa densité et son impact sur le gonflement linéaire. Plus la densité est faible et plus le gonflement est important. Ceci traduit une meilleure accessibilité de l'eau aux argiles gonflantes lorsque le sol est peu compacté du fait d'une plus grande perméabilité. Tout défaut de compactage devra donc être évité.

On note sur la Figure 2 une diminution de l'indice de plasticité (passant de 31.1 à 9%) après traitement. L'ajout de sable dilue l'argilosité mais impacte peu entre 35 et 65% d'ajout (passant de 14 à 9%). L'ajout conjoint de chaux éteinte impacte le sol par floculation : les argiles gonflantes perdent de leur plasticité après échange ionique avec les ions calcium, ce qui impacte le gonflement linéaire. En revanche, la quantité de chaux éteinte ajoutée semble impacter peu cette diminution. Que l'on ajoute 3 ou 5% de chaux, la diminution reste assez similaire.

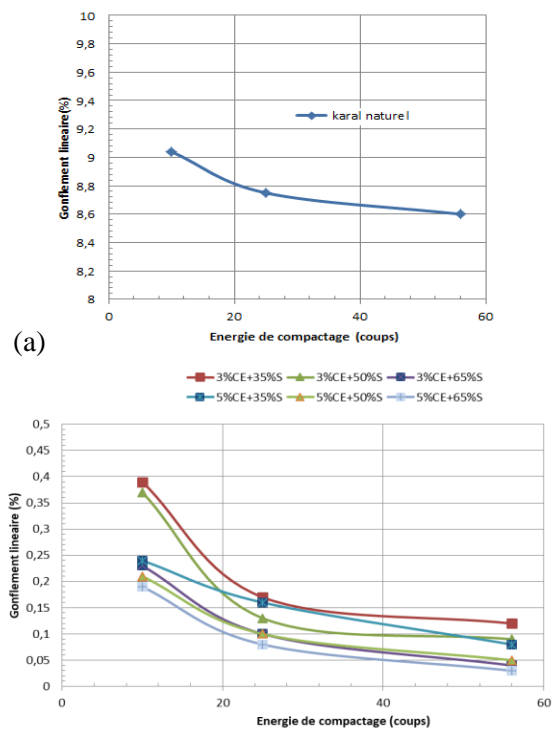


Figure 1: Effet de l'énergie de compactage sur le gonflement linéaire du (a) sol Karal naturel compacté à w_{opt} (soit 17%) avec différentes énergies de

compactage, (b) sol Karal traité avec un traitement chaux éteinte/sable et compacté à w_{opt} .

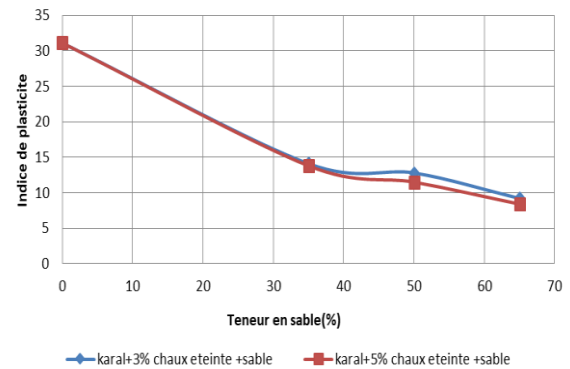


Figure 2: Effet du traitement mixte chaux/sable sur l'indice de plasticité du Karal

Pour ce qui est de la valeur de CBR sur la Figure 3, on constate une augmentation de sa valeur correspondant à 0,66 à l'état naturel après un compactage à 95% de l'optimum Proctor modifié (OPM), à environ 19000 et 20000 fois plus après mélange avec 3%CE+65%S et 5%CE+65%S. Cette augmentation de la valeur CBR montre l'effet considérable de la chaux sur les propriétés des argiles gonflantes de type Karal. En effet, cette augmentation avec la quantité de chaux et de sable ajoutés est corrélée à l'augmentation de la masse volumique sèche après compactage qui varie de 1,66 à 1,96 g/cm^3 . Notons également que la floculation des sols argileux a généralement un effet contraire à ce que l'on observe c'est-à-dire une diminution de la densité. Le sable quant à lui apporte un effet de dilution des argiles ce qui de ce fait diminue l'argilosité des sols et sa sensibilité à l'eau complétant ainsi l'effet de la floculation.

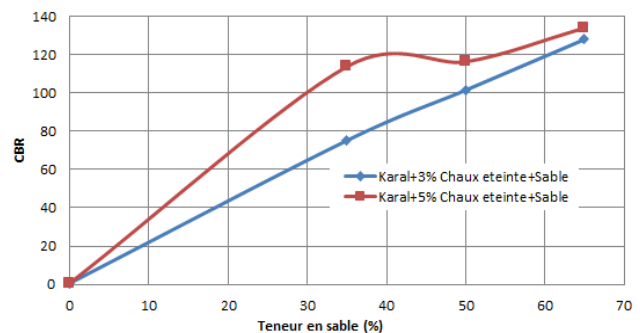


Figure 3: Effet du traitement mixte chaux/sable sur le CBR du Karal compacté à 95% de l'OPM

3.2 Effet du traitement mixte chaux/sable sur la résistance à la compression simple

L'effet du traitement mixte chaux/sable sur la résistance à la compression simple est montré sur la Figure 4.

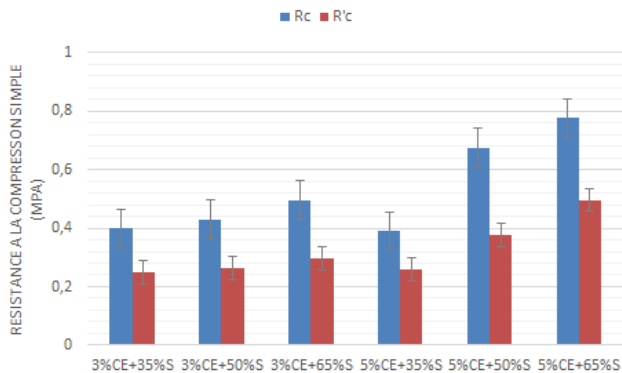


Figure 4: Effet du traitement mixte chaux/sable sur la résistance à la compression simple après 7 jours de cure endogène en bleu et une cure de 3 j à l'air et 4 j dans l'eau en orange.

Comme escompté, les valeurs de Rc augmentent avec l'ajout de chaux éteinte et de sable. Ces valeurs peuvent atteindre 0,78 MPa après addition de 5% de chaux éteinte et 65% de sable. Cette augmentation aurait été plus importante à 28, 60 et 90 jours de cure. Cette augmentation de Rc (comme celle de la valeur CBR) est reliée à la formation de composés cimentaires comme les CSH (silicates de calcium hydratés), CAH (aluminates de calcium hydratés) ou CASH (aluminosilicates de calcium hydratés). Ces composés sont issus de la réaction des argiles notamment les kaolinites et montmorillonites au contact de la chaux éteinte qui impose un milieu basique propice à la dissolution des argiles. Après une durée plus longue de maturation, les réactions pouzzolaniques entre argiles et chaux vont en s'amplifiant.

Cependant, les résultats de la Figure 4 montrent aussi une diminution des valeurs de résistance après immersion. Cette différence serait due à la sensibilité du matériau à l'eau, même après traitement. Un comportement similaire a été obtenu par Bakaiyang (2022).

3.3 Essai de durabilité : évolution de la perte de masse au cours des cycles

La perte de masse des éprouvettes traitées est observée sur la Figure 5 au cours des cycles d'humidification séchage (après 90 j de cure).

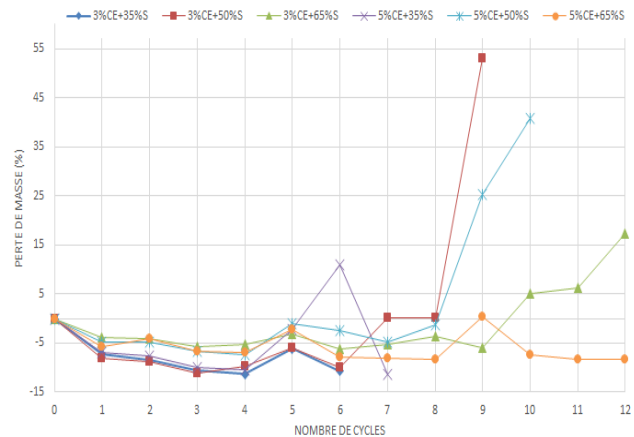


Figure 5: Evolution de la perte de masse des éprouvettes au cours des cycles

Des valeurs de pertes de masse négatives, observées jusqu'à la fin du 6-7^{ème} cycles, implique (par appliqué $PM (\%) = 100 \times (m_{90 \text{ jrs de cure}} - m_{\text{apr cycles}}) / m_{90 \text{ jrs de cure}}$) une augmentation de la masse des éprouvettes au cours des cycles (exception faite des éprouvettes traitées à 3% ou 5%CE+35%S dont la dégradation ne permet plus de mesure au delà des 6-7^{ème} cycles). Cette augmentation de la masse des éprouvettes au cours des premiers cycles est probablement due à la forte capacité de rétention d'eau du Karal, même après traitement (en accord avec Bakaiyang et al., 2021). Malgré le séchage, une quantité importante d'eau reste piégée dans les mottes de sol compactées (eau capillaire et physisorbée) et dans les agrégats argileux, d'où une augmentation de la masse à la fin des cycles. Un remaniement de la microstructure entraînant une décompaction progressive peut aussi contribuer au cours des cycles à augmenter la capacité de rétention d'eau, première étape avant la perte de masse positive des éprouvettes à partir du 8^{ème} cycle (pour 3%CE+50%S et 5%CE+50%S) et du 9^{ème} cycle (pour 3%CE+65%S), via un processus de désagregation et de perte de cohésion. Pour les éprouvettes traitées à 3% ou 5% CE+50%S, les pertes de masse s'amplifient jusqu'à 38-54% à la fin des cycles 9 et 10 respectivement contre le cycle 12 pour l'éprouvette traitée à 3%CE+65%S. De manière générale, la perte de masse est moins importante lorsqu'on augmente le dosage en liant et en sable utilisés pour le traitement. Seul le traitement avec le maximum de chaux éteinte soit 5% et le maximum de sable testés soit 65% dans le cadre de cette étude montre une quasi absence de perte de masse même après 12 cycles. La présence d'une certaine quantité de karal soit 30% est donc admise dans un sable sans pour autant entrainer de la désagregation sous sollicitation

hydrique. Ce résultat est cohérent avec le seuil de 30 ou 35% généralement admis dans les classifications (NF P11-300), pour distinguer une argile sableuse (des grains dans une matrice argileuse qui gouverne le comportement) d'un sable argileux (de l'argile entre des grains de sable dont le squelette gouverne le comportement).

3.4 Evolution de la déformation volumique au cours des cycles

La variation de la déformation volumique des éprouvettes au cours des cycles est donnée par la Figure 6.

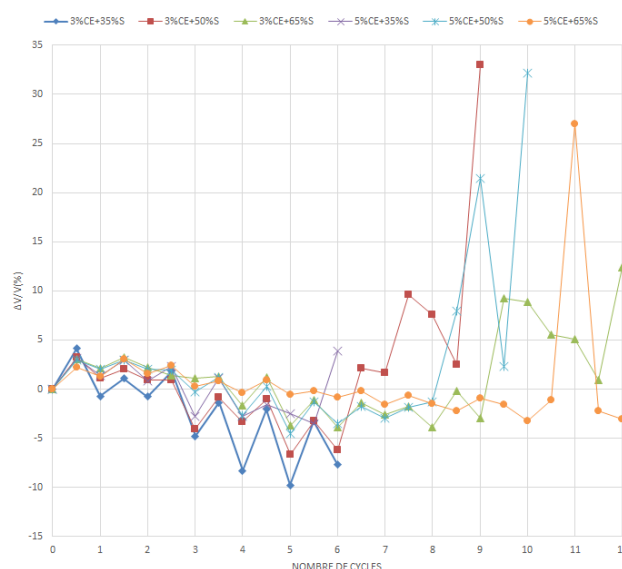


Figure 6: Evolution de la déformation volumique au cours des cycles

La déformation volumique des éprouvettes se fait en dent de scie entre l'état sec (point bas) et l'état humide (point haut) de chaque cycle et ce jusqu'au 6^e cycle. Cette augmentation de l'amplitude entre les points bas et hauts de chaque cycle montre une déformation volumique qui augmente au cours des cycles avec une désorganisation de plus en plus importante, à mettre en lien avec une augmentation de la taille des pores (Ayssami et al., 2025). Cela s'accompagne d'un remaniement de la microstructure entraînant une augmentation de la capacité de rétention d'eau du matériau au cours des cycles ce qui prépare l'étape de désagregation du matériau avec perte de matière.

Au-delà du cycle 6, les éprouvettes traitées à 3% ou 5% CE+50%S voient leur déformation volumique croître, alors que celle traitée à 3%CE+65%S attend le 9^e cycles avant de subir une augmentation. Cela démontre une durabilité

accrue pour les formulations contenant plus de sable.

3.5 Evolution de la résistance à la compression entre le 1^{er} et 12^{ème} cycle

L'évolution de la résistance à la compression simple au cours des cycles est donnée par la Figure 8. Les valeurs de Rc avant et après les cycles (démarrés après 3 mois de cure) restent supérieures aux Rc mesurées après 7j de cure.

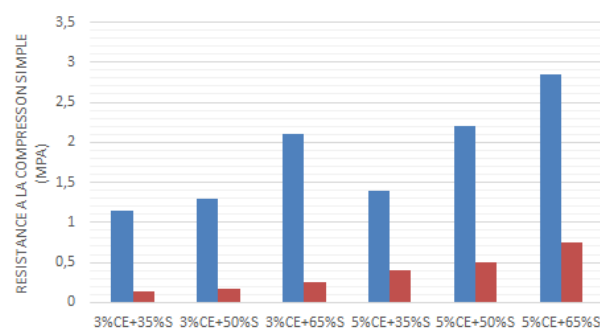


Figure 7: Evolution de la résistance à la compression simple entre les éprouvettes après 0 (en bleu) et 12 cycles (en rouge).

Il apparait de manière claire une diminution des valeurs de la résistance à la compression simple quelle que soit la formule de traitement passant de 1.1 MPa à 0.1 MPa pour le mélange 3%CE+35%S et de 2.8 à 0.7MPa pour 5%CE+65%S. Après 12 cycles, les valeurs de la résistance à la compression sont toutes inférieures à 1 MPa. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par Mehenni (2015) et De Baecque (2019) et la chute de Rc est expliquée par la dégradation progressive de la microstructure des éprouvettes au contact de l'eau.

4 CONCLUSION

Ce travail avait pour but d'étudier la durabilité du traitement des sols Karal rencontrés spécifiquement dans les régions du Nord et de l'Extrême-Nord Cameroun. Constitués majoritairement d'argiles gonflantes, avec une portance très faible (CBR=0,66) et un indice de plasticité élevé (IP=31,1), les sols Karal traités avec un mélange de chaux et de sable montrent une amélioration de leurs propriétés avec une réduction de l'IP et du potentiel de gonflement, une augmentation de la valeur de la portance (valeur CBR) et de la Rc après 7 jours de cure. Pour ce qui est de la durabilité, l'application d'un protocole basé sur des cycles d'humidification

séchage des éprouvettes, a été réalisé. Le rythme d'humidification-séchage ainsi que les valeurs de saturation recherchées sont propres au climat observé dans les régions du Nord et de l'Extrême Nord du Cameroun. Ce protocole a permis de conclure qu'il serait possible d'utiliser durablement le Karal en couches de chaussées lorsqu'il est traité avec de la chaux éteinte (au minimum 3%) et une addition de sable dans des quantités supérieures à 50%.

Dans la pratique, des dispositifs de type drainage devront être mis en place en parallèle pour éviter ou maîtriser l'humidification excessive des sols traités et il est recommandé que les travaux de terrassement soient effectués en saison sèche. La réalisation de planches d'essai sur le terrain devra compléter cette étude pour élaborer au final un Guide technique de référence propre aux sols africains, avec des conditions de réutilisation spécifiques à ces sols.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le Ministère de l'Economie, de la Planification et de l'Aménagement du Territoire (MINEPAT) au Cameroun, pour avoir financé ces travaux de recherche, ainsi que le Laboratoire National de Génie Civil (LABOGENIE) où la plupart des essais ont été réalisés.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Ayssami, D., Boussafir, Y., Hemmati, S., Chevalier, C., & Reiffsteck, P. (2025). Effect of varying hydric cycles on the different properties of a silt-kaolinite mixture. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 29(15), 3527–3552. <https://doi.org/10.1080/19648189.2025.2523891>
- Baana, A., Mamba, M., Danwe, R. and Elime, B.A. (2015). Sand effect on linear shrinkage of swelling clays of the far north region Cameroon, *International Journal of Engineering Technology and Scientific Innovation*, vol. 1, pp. 222-237.
- Baana, A. (2020). Lithostabilisation des sols gonflants : cas du Karal de la région de l'Extrême-Nord du Cameroun. PhD thesis, Université de Yaoundé I, Cameroon.
- Bakaiyang, L. (2022). *Durabilité du traitement des argiles gonflantes de type Karal stabilisées pour des applications en construction routière*. PhD thesis, Université de Yaoundé I, Cameroon.
- Bakaiyang, L., Madjadoumbaye, J., Boussafir, Y., Szymkiewicz, F. and Duc, M. (2021). Re-use in road construction of a Karal-type clay-rich soil from North Cameroon after a lime/cement mixed treatment using two different limes, *Case Studies in Construction Materials*, vol. 15, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e0062606>.
- Bakaiyang, L. (2014). *Contribution à l'entretien des routes revêtues en zone tropicale : cas des régions du Grand-Nord Cameroun*. Mémoire en vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur de Génie Civil, Université de Yaoundé, Cameroun, 104p.
- Chen, F.H. (1988). *Foundations on expansive soil*. Elsevier Science Pub., New York.
- De Baecque, M. (2019). *Caractérisation multi-physique de la durabilité d'un sol traité à la chaux pour une application aux digues maritimes*. Thèse en vue de l'obtention du grade de Docteur, Université Paris Est, 231p.
- Eades, J.L., Grim, R.E. (1966). *A quick test to determine requirements for lime stabilization*. Highway Research Board Bulletin, 139: 61-72.
- Limaleba, R.B., Ayina; O.L.M. , Madjadoumbaye, J.(2016). Physical and mechanical characterization of a swelling clay: The case of Dabanga Karal in the Far North Region of Cameroon, *International Journal of Engineering Research and Technology*, vol. 5, pp. 910-913.
- Livet, M. (1988). *Études : Sols argileux gonflants-Site expérimental de Waza-Maltam, Rapport de Synthèse*, Cameroun, 33p.
- Magnan, J.P. (2013). Panorama des sols gonflants en géotechnique. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, N°280-281 pp. 85-103.
- Mehenni, A.(2015). *Comportement hydromécanique et érosion des sols fins*. Thèse en vue de l'obtention du Grande de Docteur, université de Lorraine, France, 213p.
- Ngale, H.E., Tchangnwa, N.F., Touagam, T.B.(2014). Karal Clay in the Far North Cameroon : study on behavioural floor structures, *International Journal of Engineering Research and Development*, vol. 10, pp. 29-40.
- NF EN ISO 17892-4 (2018). Reconnaissance et essais géotechniques-Essais de laboratoire sur les sols-Partie 4: Détermination de la distribution granulométrique des particules, AFNOR, Paris.
- NF P11-300 (2025). Terrassements-Classification complémentaire des matériaux de terrassement, AFNOR, Paris.
- NF P 94-050 (1995). Sols: reconnaissance et essais-Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux-Méthode par étuvage, AFNOR, Paris.
- NF P 94-051 (1993). Sols: reconnaissance et essais-Détermination des limites d'Atterberg-Limite de liquidité à la coupelle-Limite de plasticité au rouleau, AFNOR, Paris.
- NF P 94-068 (1998). Sols : reconnaissance et essais-Mesure de la capacité d'absorption 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, AFNOR, Paris.
- NF P 94 078 (1997). Sols : reconnaissance et essais-Indice CBR après immersion. Indice CBR immédiat. Indice portant Immédiat-Mesure sur échantillon compacté dans le moule CBR, AFNOR, Paris.

- NF P 94 093 (2014). Sols : reconnaissance et essais- Détermination des références de compactage d'un matériau- Essai Proctor Normal-Essai Proctor modifié, AFNOR, Paris.
- NFX31-130 (1999). Qualités des sols-Méthodes chimiques- Détermination de la capacité d'échange cationique (CEC) et des cations extractibles, AFNOR, Paris.
- Ngale, H.E., Tchangnwa, N.F., Touagam, T.B. (2014). Karal Clay in the Far North Cameroon: study on behavioural floor structures, *International Journal of Engineering Research and Development*, vol. 10, pp. 29-40.
- Temga, J.P., Zo'o Zame, P., Abessolo, M., Madi, M.A., Nguetnkam, J.P., Bitom, D.L., Basga, S.D. (2017). Caractérisation géo-mécanique et classification des matériaux vertisoliques de la vallée du Logone au Cameroun, *Proceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Seoul 2017, pp. 397-401.
- Temga, J.P., Balo, M.A., Basga, D.S. Zo'o Zame, P. Abessolo, A.M., Mache, J.R., Nguetnkam, J.P., Bitom, L.D. (2018). Lime – and sand – stabilization of clayey materials from the Logone valley (Lake Chad basin) for their utilization as building materials, *Journal of Building Engineering*, vol. 19, pp.472–479, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.06.003>.