

COMPORTEMENT DES ARGILES GONFLANTES DE TYPE KARAL TRAITÉES POUR UNE APPLICATION ROUTIÈRE

BEHAVIOR OF KARAL TYPE SWELLING CLAYS AFTER TREATMENT FOR ROAD APPLICATIONS

Lemankreo BAKAIYANG¹, Myriam DUC², Yasmina BOUSSAFIR³, Fabien SZYMKIEWICZ⁴, Jérémie MADJADOUMBAYE⁵

^{1, 5} Université de Yaoundé I, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique, Département de Génie Civil, Laboratoire ECM, Yaoundé, Cameroun

^{2, 3, 4} Université Gustave Eiffel, IFSTTAR, GERS/SRO, 14-20 boulevard Newton, Champs-sur-Marne, 77447 Marne-la-Vallée, France

RÉSUMÉ – Cette communication présente les résultats du traitement avec un mélange chaux/ciment des argiles gonflantes de type Karal rencontrées dans les régions du Nord Cameroun. Le traitement induit clairement une amélioration des propriétés de ce type d'argile ce qui prouve qu'il est possible d'utiliser durablement ce type de sol en couche de chaussées moyennant certaines dispositions constructives.

ABSTRACT – This paper presents the effects of a mixed cement/lime treatment on a Karal-type swelling clay-rich soil encountered in the regions of North Cameroon. The treatment improved clearly the soil properties, which demonstrates the possible use of such soils in the long term in pavement layers by respecting particular constructive measures.

1. Introduction

Les argiles gonflantes sont connues pour engendrer des phénomènes de retrait et de gonflement à l'origine de la fissuration longitudinale observée sur les routes. Les sols contenant ces argiles sont connus 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 (ou berbéré). Connus aussi sous le nom de « vertisols », ils couvrent d'après Masse (1992), plus de 257 millions d'hectares des terres immergées et sont selon Dudal (1965) plus concentrés en Inde (72 millions d'ha), suivi du Nord de l'Australie (71 millions ha) puis en Afrique tropicale notamment dans le Grand-Nord Cameroun, le Nigeria, le Soudan, le Tchad, l'Éthiopie, le Kenya, le Zimbabwe, l'Afrique du Sud et la Somalie. D'après les estimations de Magnan (2013), les argiles gonflantes représentent 10% des sols africains. Les argiles gonflantes représentent à ce titre de grandes quantités de matériaux qui peuvent servir de ressources dans le domaine des terrassements afin de réaliser le support de routes revêtues.

Or ces argiles sont jugées comme « nuisibles à la route », aussi faut-il envisager généralement un traitement aux liants hydrauliques de manière à limiter la mise en décharge des couches des sols in situ pour les remplacer par des matériaux apportés avec de meilleures propriétés. Il s'agit par le traitement d'atteindre l'objectif «zéro emprunt, zéro dépôt » et ainsi de minimiser le coût de la construction des chaussées tout en respectant les seuils réglementaires. La solution du traitement aux liants hydrauliques (chaux et/ou ciment) est donc une solution idéale pour atteindre cet objectif. Toutefois, des réserves ont été émises par Diop (2002) quant à cette solution car une fissuration

excessive au niveau des couches de superstructures routières a été observée alors que les matériaux latéritiques à forte argilosité employés ont subi un traitement au ciment.

Les argiles gonflantes de type Karal rencontrées spécifiquement dans le Nord du Cameroun présentent de la même manière une forte argilosité à l'image des sols latéritiques avec lesquels on peut les confondre compte tenu de la couleur de certains karal. Des dégradations de la chaussée sont observées lorsque les sols karal sont stabilisés avec seulement du ciment ce qui est courant dans la région, la chaux et en particulier la chaux vive n'étant pas disponible localement faute de production industrielle. L'absence de chaux couplée au ciment est sans doute en grande partie à l'origine de ce phénomène.

Par ailleurs, pour évaluer de manière plus juste l'efficacité des traitements, il est nécessaire d'étudier le comportement à long terme des sols Karal après de multiples cycles d'humidification/séchage proches des cycles imposés par le climat auquel ces sols sont soumis. En se basant sur la littérature, aucune étude n'a été réalisée pour étudier la durabilité des sols Karal traités au ciment couplée à la chaux (et notamment la chaux éteinte) et ainsi montrer qu'il est réellement possible d'utiliser durablement les sols Karal en couche de chaussée lorsqu'ils sont stabilisés. Cet article a donc pour objectif de démontrer que les sols Karal après traitement peuvent être valorisés en construction routière.

2. Matériaux et méthodes

2.1. Origine du sol testé

Le matériau étudié est un sol de type Karal prélevé à Pitoa (N9°22'31.4" / E13°28'25.2"), une localité située dans la région du Nord Cameroun. Du point de vue minéralogique, ce matériau est constitué en majorité de quartz (19%), de montmorillonite (15,5%), d'illite/muscovite (5,5%) et de kaolinite (20,5%). La chaux utilisée pour le traitement est de 2 types : une chaux vive (CV) (partiellement hydratée et faiblement carbonatée) et une chaux éteinte (CE) faiblement carbonatée toutes deux fabriquées à l'usine ROCA située à Figuil alors que le ciment est un CEMII 32,4R de l'usine CIMENCAM (Figuil) proche de l'usine ROCA (noté Ci).

2.2. Méthodes utilisées

Les essais réalisés en laboratoire ont permis la caractérisation géotechnique, minéralogique et chimique des sols Karal conformément aux normes françaises. Pour ce qui est de la durabilité des traitements de sols appliqués, un protocole a été élaboré. Il consiste en des cycles d'humidification / séchage. Deux types de cycles ont été appliqués à des éprouvettes de dimension 8x16cm compactées à l'optimum Proctor modifié après une cure de 90 j en condition endogène : la méthode des cycles courts utilise un étuvage puis une immersion et la méthode des cycles longs impose une humidité relative lors du séchage des éprouvettes.

La méthode des cycles courts s'inspire de la norme ASTM D559 qui sert de référence dans de nombreuses études sur l'effet des cycles d'humidification/séchage sur la durabilité des sols traités au ciment et/ou à la chaux et des mortiers (Argane, 2013). Pour chaque cycle; on sèche les éprouvettes à une température de 60°C pendant 2 j à l'étuve avant de les immerger pendant 24 h dans des bacs d'eau à 20°C.

La méthode des cycles longs s'inspire des travaux de Mehenni (2015) et consiste à sécher les éprouvettes à l'air libre dans une salle réglée à la température de 20°C pendant 4, 7 et 10 jours selon les cycles (sans imposer une humidité relative de l'air ambiant). Quant à l'humidification des éprouvettes réalisée à 20°C, l'eau pénètre par remontée

capillaire via une pierre poreuse sur laquelle les éprouvettes sont posées. Un papier filtre permet d'éviter le contact direct entre la pierre poreuse et les éprouvettes. Pour permettre la remontée capillaire jusqu'au sommet de l'échantillon, chaque éprouvette est retournée à mi-cycle. La durée d'humidification est choisie en fonction de l'intensité des pluies dans la zone d'étude, variant de 2 à 8 jours. Cette durée est nécessaire pour atteindre approximativement la teneur en eau initiale du matériau. Les cycles humidification-séchage ont duré au total 5 mois, ce qui représente la durée moyenne de la saison pluvieuse dans le Nord Cameroun. La pluviométrie n'étant pas constante durant toute la saison pluvieuse, on impose une durée variable des cycles. En effet, les pluies sont rares dès leurs deux premiers mois, mais deviennent plus présentes le troisième mois, et enfin violentes les deux derniers mois de la saison. Ces spécificités sont prises en compte lors de la réalisation des cycles humidification-séchage en laboratoire.

Au cours des cycles longs ou courts, plusieurs grandeurs ont été mesurées : la résistance à la compression simple, la perte de masse et la déformation volumique ou la variation d'amplitude de gonflement/retrait.

3. Résultats et discussions

3.1. Effet du traitement mixte chaux/ciment sur les propriétés physiques et géotechniques du Karal

Les résultats ci-après montrent une réduction considérable du gonflement linéaire et de l'indice de plasticité du sol après traitement mais surtout une augmentation de la valeur CBR (portance) de 0,66 à 88,1 et de 0,66 à 93 après un traitement mixte chaux hydratée/ciment ou chaux vive/ciment.

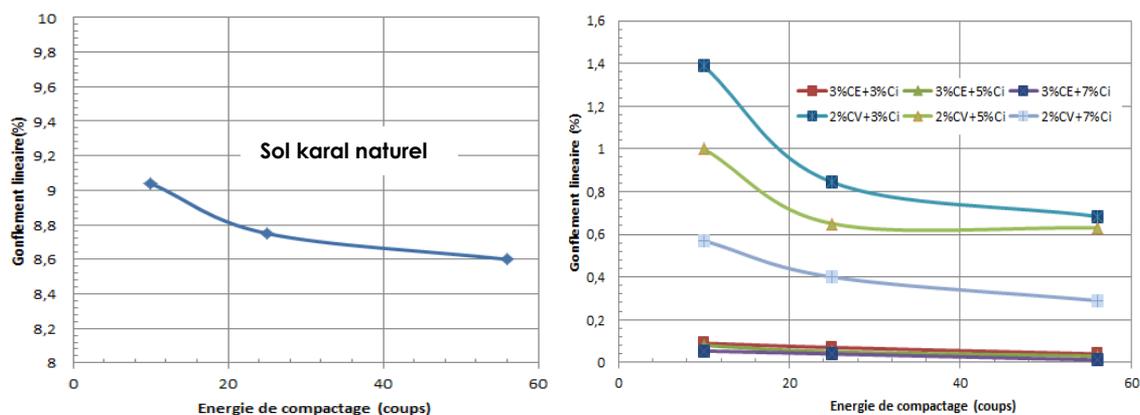


Figure1. Effet du traitement sur le gonflement linéaire du Karal (CE : chaux éteinte, Ci : ciment et CV : chaux vive)

Tableau 1 : Evolution de l'Indice de plasticité et CBR après traitement mixte chaux/ciment

Grandeurs	Karal naturel	Karal+2% CV+3%Ci	Karal+2% CV+5%Ci	Karal+2%CV +7%Ci	Karal+3%CE +3%Ci	Karal+3%CE+5 %Ci	Karal+3%CE+7%Ci
IP	31,1	13,5	13,2	12,8	18,2	17,1	15,3
CBR	0,66	66	71,5	93	58,2	61,4	88,1

Contre toute attente, on note en particulier un effet bénéfique de la chaux éteinte pourtant moins réactive que la chaux vive sur le gonflement linéaire qui est 8,6-9% sur le sol non traité à différentes énergies de compactage à une valeur inférieure à 0,1%. Ce phénomène s'explique par l'effet filler de la chaux éteinte qui réduit la capacité de l'eau à

pénétrer dans les sols traités contrairement à la chaux vive dont l'effet flocculant est plus important.

3.2. Effet du traitement mixte chaux/ciment sur la résistance à la compression

Du point de vue mécanique, la résistance à la compression simple R_c sur la Figure 2 augmente avec l'ajout de ciment et avec le temps de cure, jusqu'à atteindre des valeurs de 2,7 MPa et 3,8 MPa après 90 jours après un traitement à la chaux éteinte/ciment et chaux vive/ciment, respectivement (Bakaiyang et al, 2021).

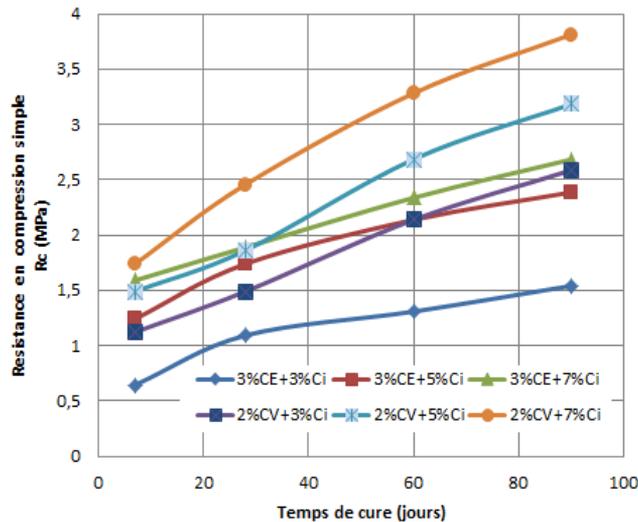


Figure 2. Effet du traitement mixte chaux/ciment sur la résistance à la compression simple

Par ailleurs, le critère de traficabilité ($R_c \geq 1$ MPa) est atteint avant 7 jours de cure pour les sols Karal traités, à l'exception du traitement à 3% de chaux hydratée/3 % de ciment, pour lequel le critère de traficabilité est obtenu après 26 jours. Enfin, selon le GTS/GTR, le sol Karal testé après traitements apparaît résistant à l'immersion (Bakaiyang et al, 2021).

3.3. Effet des cycles sur le comportement du sol Karal après traitement mixte chaux/ciment

3.3.1. Evolution de la résistance à la compression au cours des cycles

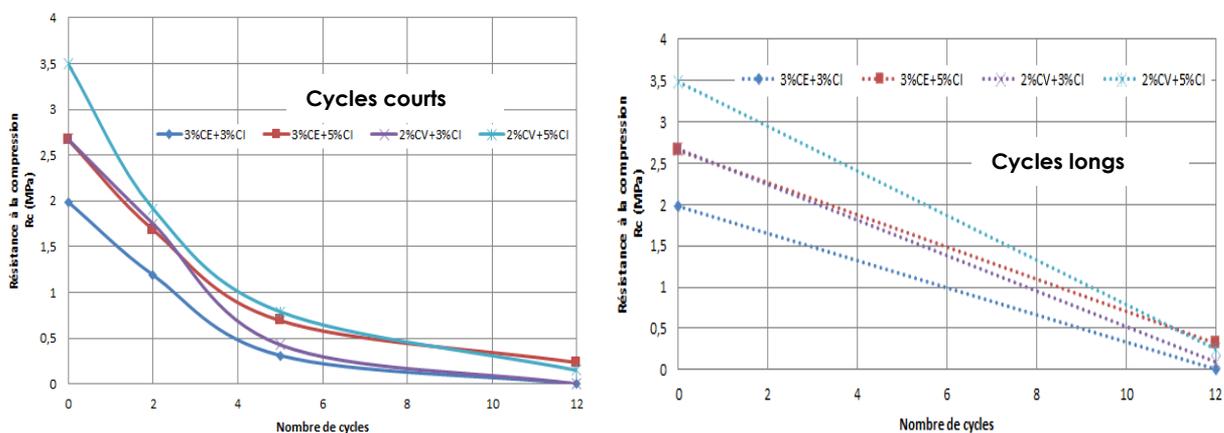


Figure 3. Evolution de la résistance à la compression simple en fonction des cycles

La Figure 3 montre l'évolution de la résistance à la compression simple au cours des cycles. Une diminution de la R_c apparaît clairement après 2, 5 ou 12 cycles (courts ou longs) quel que soit le traitement. Après 12 cycles, les éprouvettes atteignent dans tous les cas des $R_c < 0,5$ MPa. L'augmentation du ciment semble agir de manière favorable

sur les Rc sans pour autant empêcher la dégradation des propriétés selon une tendance commune à tous les mélanges alors que l'impact de la chaux vive et de la chaux éteinte utilisées dans cette étude reste plus difficile à décrire.

Ces résultats sont en accord avec ceux de Mehenni (2015) et De Baecque (2019) qui associent cette diminution à une dégradation progressive de la microstructure des éprouvettes au contact de l'eau. Cette diminution de la résistance à la compression au cours des cycles devrait être prise en compte dans le dimensionnement, par notamment des dispositifs de type drainage pour éviter ou maîtriser l'humidification excessive.

3.3.2. Evolution de la déformation volumique au cours des cycles

L'évolution de la déformation volumique ($\Delta V/V_0$) au cours des cycles est montrée sur la Figure 4.

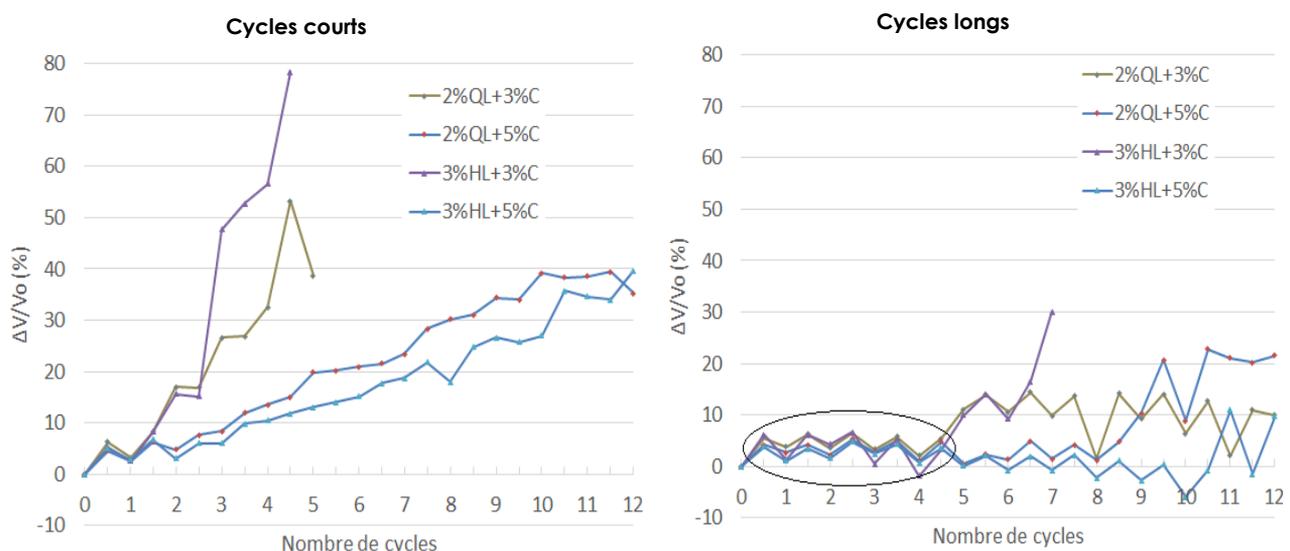


Figure 4. Evolution de la déformation volumique des sols Karal traités en fonction des cycles (cycles courts et cycles longs)

La déformation volumique des éprouvettes soumises aux cycles courts augmente de manière progressive et rapide jusqu'à atteindre 78,4% pour le traitement à 3%CE+3%Ci et 53,2% pour celui à 2%CV+3%Ci. Cette déformation est atteinte en moins de 6 cycles et ne semble pas stabilisée. La variation volumique des sols traités à 3%CE+5%Ci et 2%CV+5%Ci évolue de manière plus lente et après 12 cycles, elle semble se stabiliser autour de 40%. Là encore, le comportement semble plus fortement relié à la teneur en ciment (qui remplit les pores) qu'à la teneur en chaux éteinte ou chaux vive qui finalement jouent des rôles assez similaires dans ce cas. Ces résultats sont en accord avec ceux de Packard et al. (1963) qui associent la variation volumique au cours des cycles à la nature du traitement du sol.

Concernant la déformation volumique des éprouvettes soumises aux cycles longs, elle évolue de manière prononcée en dent de scie entre les phases de séchage et d'humidification et au niveau de la succession des cycles. L'évolution quasi-constante pendant les cinq premiers cycles s'explique par la quasi-absence de pertes de matière au niveau des éprouvettes. Les cycles longs sont moins agressifs initialement que les cycles courts. Cependant, au-delà de 5 cycles, la dégradation des éprouvettes ne contenant que 3% de ciment débute et elle est liée à l'augmentation de la durée d'humidification qui passe de 4 à 7 jours.

3.4. Application en construction routière

Deux approches sont utilisées pour valoriser les sols traités en construction routière : l'approche du guide du CEBTP utilisée pour les sols et l'approche décrite dans le GTR/GTS.

3.4.1 Approche du CEBTP

Le Tableau 2 récapitule les critères utilisés par le CEBTP pour une utilisation en couche de chaussées des sols à l'état naturel, ainsi que les résultats obtenus sur les échantillons de sol Karal naturel et de sols traités avec différents teneurs en chaux (vive ou éteinte) et en ciment. On note que :

- Le sol Karal naturel ne peut être utilisé ni en plate-forme, compte tenu de son gonflement linéaire très élevé (>2%), ni en couche de forme ou fondation compte tenu de la non-satisfaction de la plupart des critères fixés par le CEBTP ;
- Après traitement mixte aux différents teneurs en chaux (vive/éteinte) et ciment, on observe :
 - o Une diminution de l'indice de plasticité de 31,1 jusqu'à une valeur de 12,8 pour un traitement à 2% de chaux vive et 3% de ciment ;
 - o Une diminution du gonflement linéaire de 8,7% à 0,04% après un traitement à 3% de chaux éteinte et 7% de ciment ;
 - o Une augmentation de la portance CBR du Karal de 0,88 à 93 après traitement à 2% de chaux vive et 7 % de ciment ;
 - o Une augmentation graduelle de la densité sèche maximale, de la teneur en eau optimale et du pourcentage du passant à 80µm.

Tableau 2. Synthèse des caractéristiques des sols Karal obtenus avant et après traitement

Critères imposés par le CEBTP pour une valorisation des sols en couche de chaussée		Résultats obtenus avant et après traitement du Karal						
		Karal Naturel	Karal+2% CV+3%Ci	Karal+2% CV+5%Ci	Karal+2% CV+7%Ci	Karal+3% CE+3%Ci	Karal+3% CE+5%Ci	Karal+3% CE+7%Ci
Plate-forme	$I_p < 40$	31,1	13,5	13,2	12,8	18,2	17,1	15,3
	$w_L < 70$	67,1	42,6	42,5	38	61,1	44,9	41,8
	$GL < 2\%$	8,75	0,844	0,65	0,4	0,07	0,05	0,04
	$MO < 3\%$	0,71	NM	NM	NM	NM	NM	NM
Couche de	$CBR > 5$	0,66	66	71,5	93	58,2	61,4	88,1
	$I_p < 20$	31,1	13,5	13,2	12,8	18,2	17,1	15,3
	$P_{80} < 35$	93,9	94,80	95,50	95,70	94,50	94,70	95,30
	$1,9 < \rho_{dmax} < 2,1$	1,66	1,68	1,69	1,71	1,70	1,74	1,75
Couche de fondation	$7 < W_{opt} < 13$	17	19,95	20,6	20,9	18,24	19,68	20,56
	$CBR > 30$	0,66	66	71,5	93	58,2	61,4	88,1
	$10 < P_{80} < 35$	93,9	94,80	95,50	95,70	94,50	94,70	95,30
	$5 < IP < 20$	31,1	13,5	13,2	12,8	18,2	17,1	15,3

Les valeurs satisfaisantes obtenues après le traitement du sol Karal ainsi que la démonstration de la durabilité des sols traités soumis à des cycles d'humidification-séchage répétés, vont dans le sens d'une possible utilisation des sols karal en construction routière.

Cependant, d'après le guide CEBTP (guide par excellence d'utilisation des sols en construction routière au Cameroun), on ne peut pas conclure 'réglementairement' si les sols Karal traités peuvent ou non être utilisés en construction routière. En effet, ce guide ne définit pas les caractéristiques physico-mécaniques minimales à atteindre post traitement (propriétés initiales) ou après des cycles de dégradation (évolution des propriétés au cours du temps) des argiles gonflantes traitées pour une valorisation en construction routière. A cet égard, le guide du CEBTP devrait être enrichi de nouvelles

pratiques au niveau des tests en laboratoire complétés par des tests in situ pour validation.

3.4.2 Approche du GTR/GTS

Selon l'approche du GTR/GTS, on note :

- Le laps de temps de cure autorisant la circulation au jeune âge : la couche de chaussée peut être circulée dès que $R_c \geq 1 \text{MPa}$. Cette valeur est atteinte à 7 jours pour tous les échantillons de sols Karal traités sauf celui traité à 3%CE+3%Ci dont la valeur minimale de $R_c \geq 1 \text{MPa}$ a été atteinte à 26 jours ;
- La résistance à l'immersion est appréciée par le rapport R'_{c60}/R_{c60} (R'_{c60} est la résistance à la compression simple mesurée après 28 jours de cure normale suivi de 32 jours d'immersion et R_{c60} est la résistance à la compression mesurée après 60 jours de cure normale). Ces valeurs sont données par le Tableau 3.

Tableau 3 : Valeurs de Résistance à la compression avec ou sans immersion

Paramètres	Temps de cure (jours)	3%CE +3%Ci	3%CE +5%Ci	3%CE +7%Ci	2%CV +3%Ci	2%CV +5%Ci	2%CV +7%Ci
Rc sans immersion (MPa)	7 jrs	0,64	1,24	1,59	1,12	1,49	1,74
	28 jrs	1,09	1,74	1,89	1,49	1,86	2,46
	60 jrs	1,31	2,14	2,34	2,14	2,68	3,28
	90 jrs	1,54	2,39	2,68	2,58	3,18	3,81
R'c après immersion (MPa)	3 jrs +4 eau	0,55	0,89	1,15	0,66	1,09	1,40
	21 jrs +7 eau	0,89	1,19	1,79	0,99	1,39	2,19
	28 jrs +32 eau	1,19	1,31	1,89	1,39	1,66	2,62
R'_{c60}/R_{c60}	--	0,91	0,61	0,81	0,65	0,62	0,80

Or les conditions favorables pour obtenir une résistance à l'immersion correspondent à un rapport R'_{c60}/R_{c60} supérieur à 0,6 ou 0,8 pour les sols avec $V_{bs} > 0,5 \text{ g} / 100 \text{ g}$ ou $V_{bs} \leq 0,5 \text{ g} / 100 \text{ g}$, respectivement. Au regard de la valeur de V_{bs} estimée à $7,2 \text{ g} / 100 \text{ g}$ du sol karal testé et des rapports R'_{c60}/R_{c60} supérieurs à 0,6 (ou très proches de 0,6) pour les échantillons traités à la chaux et au ciment du Tableau 3, les sols Karal traités quel que soit le traitement sont considérés comme résistants à l'immersion.

4. Conclusion

Cette communication avait pour objectif d'étudier le comportement des argiles de type Karal provenant de la région du Nord Cameroun, traitées pour des applications en construction routière. Il ressort que les sols Karal sont composés en majeure partie par des argiles gonflantes (montmorillonite) et se caractérisent par une portance très faible ($\text{CBR}=0,66$). Un traitement mixte chaux (vive et éteinte) avec du ciment a été testé ce qui a permis de réduire considérablement l'indice de plasticité et le gonflement linéaire des éprouvettes de sol, tout en augmentant de manière importante la valeur CBR (portance) et de la résistance à la compression simple R_c . Outre les performances à atteindre après le traitement et un certain nombre de jours de cure, aucun test de durabilité (évolution des performances sous sollicitation climatique) n'est considéré dans les guides habituellement appliqués. Cette absence de test ne permet pas d'apprécier sur le long terme la tenue des sols ce qui peut expliquer la survenue de dégradations prématurées sur des chaussées. Dans le cadre de la présente étude, la durabilité évaluée sur des cycles humide/sec selon deux protocoles a permis de mieux appréhender l'effet des traitements. Selon le type de cycle (long ou court) utilisé, une détérioration plus ou moins rapide des éprouvettes est observée, ce qui démontre une résistance au contact de l'eau plus ou moins marquée.

Les cycles courts (accélérés et agressifs) altèrent plus fortement et rapidement les éprouvettes contrairement aux cycles longs. On note également que l'ajout de ciment semble être le paramètre déterminant sur la résistance à la dégradation. Plus la teneur en liant est élevée, plus les dégradations sur les éprouvettes sont faibles et/ou retardées dans leur apparition alors que l'ajout de chaux éteinte ou vive (dont les caractéristiques sont spécifiques à cette étude) est moins impactant. La présence de chaux reste toutefois nécessaire pour obtenir les performances escomptées.

Les résultats obtenus au cours des cycles montrent donc qu'il serait possible d'utiliser durablement en couches de chaussées les sols Karal traités moyennant certaines dispositions constructives. Les résultats varient en fonction du protocole des cycles appliqués aussi pour compléter les guides existants, il serait nécessaire d'introduire des essais de durabilité avec un protocole propre au contexte climatique où le projet de chaussée doit être implanté.

5. Références bibliographiques

- Argane R. (2013). Valorisation des rejets miniers à faible teneur en sulfures comme granulats pour mortiers. Thèse de doctorat en chimie, INSA Lyon.
- ASTM-D559 (2003). Standard Test Methods for wetting and drying compacted soil-cement Mixtures.
- Bakaiyang L., Madjadoumbaye J., Boussafir Y., Szymkiewicz F., 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>.
- CEBTP(1984). Guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux, Ministère des Relations Extérieures, Coopération et Développement, France.
- 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
- Diop M. (2002). Conception des structures routières sur Marnes et argiles gonflantes. Études de cas : Bargny-Diamniadio. Mémoire en vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur de Génie Civil, Université Tcheikh Anta Diop de Dakar, Sénégal, 80p.
- Dudal R. (1965). Suelos arcillosos oscuros de las regiones tropicales y subtropicales. FAO. 170 p.
- GTR (1992). Guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme», Editions de SETRA-LCPC. Fasc. I : Principes Généraux, 98 pages, réf. D9233-1. Fasc. II : Annexes techniques, 102 pages, réf. D9233-2.
- GTS (2000). Guide technique « Traitement des sols à la chaux et/ou liants hydrauliques. Application à la réalisation des remblais et couche de forme », LCPC-SETRA (Paris-Bagneux) juin 2000. 240p.
- Magnan J.P. (2013). Panorama des sols gonflants en géotechnique. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, N°280-281 pp. 85-103.
- Masse D. (1992). Amélioration du régime hydrique des sols dégradés en vue de leur réhabilitation. Cas des vertisols du Nord-Cameroun. Thèse en vue de l'obtention du grade de Docteur, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 187p.
- 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.
- Packard R.G., & Chapman G.A. (1963). Developments in durability testing of soil-cement mixtures. *Highway Research Record* 36, pp.97–123.