International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2024 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/
Vol. 46 No. 2 September 2024, pp. 61-82

Étude De L'influence Des Débris De Coquillages Non Calcinés Et Calcinés Sur Les Remblais Routiers De La Zone Littorale EST De Madagascar

Rakotomalala Miarintsoa Fetraniaina[1], Rakotomalala Zolimboahangy[1], Ranaivoniarivo Velomanantsoa Gabriely[1], Ratsimbazafy Hery Mikaela[2]

[1]Université d'Antananarivo, École Supérieure Polytechnique Antananarivo, Mention Science et Ingénierie des Matériaux. BP 1500 Antananarivo 101 Madagascar
[2]Centre National de Recherches Industrielle et Technologique, Département Matériaux et Génie Civil. BP 6294 Antananarivo 101 Madagascar
Email de l'auteur correspondant : fetramiary@gmail.com

(cc) BY

Résumé – Notre étude consiste aux essais de stabilisation des sols de remblais routiers de la RN5 sur la zone littorale EST de Madagascar en valorisant des débris de coquillages qui sont des déchets biologiques en abondance pendant toute l'année. Les différentes déformations et dégradations de cette route sont attribuées à la construction de la route RN5 sur des sols à faible profondeur (Site 1 : Ambodiatafana, à environ 0,85m de profondeur, et Site 2 : Ambinany Sahavary, à environ 0,65m de profondeur). La présence d'eau peut entraîner une instabilité du sol. Le sol est susceptible de subir une saturation par l'eau, ce qui réduit sa capacité portante et accroît le risque de mouvements de terrain, d'affaissements ou d'érosion. Afin de remédier, il sera nécessaire de prendre en compte des mesures visant à garantir la durabilité de ces routes, notamment. Les essais de caractérisation des échantillons de sol prélevés sur 2 milieux différents permettent de dire que les sols donnent des caractéristiques géotechniques médiocres aux routes en terre situant dans la zone d'étude. Ils ont une texture limoneuse mal graduée. Les débris bien nettoyés, dépourvus d'impuretés, entre autres, reste de chairs, des boues, etc. sont utilisés sous 2 formes : en poudre fine non calcinée et en poudre fine calcinée. La calcination des débris de coquillages se fait à une température d'environ 800°C. À cette température, le carbonate de calcium se décompose en oxyde de calcium (CaO) et en dioxyde de carbone (CO_2). Des études de formulations sur le rapport poudre/sol ont été effectuées selon les pourcentages des poudres allant de 5, 10, 15 et 20%. Les résultats avec les débris calcinés montrent une efficacité évolutive sur l'indice de portance CBR du sol. L'ajout de 15% de débris de coquillages calcinées présente une augmentation de la portance CBR jusqu'à 56% à 0h (zéro heure) et 106% à 96h (après immersion dans l'eau), par rapport à la portance CBR du sol à l'état naturel. Cette formulation a permis d'atteindre une valeur de la résistance à la compression de 3,75MPa. On a observé une diminution remarquable du gonflement relatif du sol, donc améliore la performance de la route sous diverses con ditions climatiques. La stabilisation par l'utilisation de poudre de coquillage calcinée et non calcinée a des conséquences importantes sur les caractéristiques des sols. Le sol stabilisé avec de la poudre broyée calcinée semble présenter une portance supérieure (Indice CBR plus élevé) et que le potentiel de gonflement relatif est devenu faible. Par ailleurs, le sol stabilisé à l'aide de la poudre non calcinée présente aussi une résistance légèrement moindre mais un comportement plus stable face à la présence d'humidité.

Mots clés – Sol limoneux sableux, Sol argileux sableux, poudre fine de coquillage, calcination, Remblais.

Abstract – Our study consists of soil stabilization tests of road embankments of the RN5 on the eastern coastal zone of Madagascar by recovering shell debris which is biological waste in abundance throughout the year. The various deformations and degradations of this road are attributed to the construction of the RN5 road on shallow soils (Site 1: Ambodiatafana, at approximately 0.85m depth, and Site 2: Ambinany Sahavary, at approximately 0.65m depth). The presence of water can cause soil instability. The soil is likely to become saturated by water, which reduces its bearing capacity and increases the risk of ground movements, subsidence or erosion. In order to remedy this, it will be necessary to take into account measures aimed at guaranteeing the sustainability of these roads, in particular. Characterization tests on soil

International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2024 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/
Vol. 46 No. 2 September 2024, pp. 61-82

samples taken from 2 different environments make it possible to say that the soils give poor geotechnical characteristics to the earth roads located in the study area. They have a poorly graded loamy texture. Well-cleaned debris, free of impurities, including remains of flesh, sludge, etc. are used in 2 forms: fine non-calcined powder and fine calcined powder. The calcination of shell debris takes place at a temperature of around 800°C. The addition of 15% of calcined shell debris presents an increase in CBR lift up to 56% at 0h (zero hour) and 106% at 96h (after immersion in water), compared to the CBR lift of soil in its natural state. This formulation made it possible to achieve a compressive strength value of 3.75 MPa. A remarkable reduction in the relative swelling of the soil was observed, therefore improving the performance of the road under various climatic conditions. Stabilization through the use of calcined and non-calcined shell powder has important consequences on soil characteristics. Soil stabilized with calcined ground powder appears to have greater bearing capacity (higher CBR Index) and the relative swelling potential has become low. Furthermore, the soil stabilized using non-calcined powder also has slightly lower resistance but more stable behavior in the face of the presence of humidity.

Keywords – Sandy loam soil, Sandy clay soil, fine shell powder, calcination, Backfill.

I. INTRODUCTION

Les réseaux routiers établissent des liaisons entre toutes les zones écotouristiques. Ils facilitent les moyens de transactions et échanges commerciaux et constituent un facteur clé au développement d'un pays. A Madagascar, les routes qui tiennent des places importantes dans l'évacuation et les transports des produits agricoles et vivrières. Se trouvent dans un état lamentable et peuvent pas assurer leurs fonctions en temps normal, surtout pendant et après la période de pluie. Effectivement, l'eau est l'un des facteurs de dégradation de toutes infrastructures, ceci est justifiée par la dégradation rapide des routes dans la zone EST de Madagascar, une zone qui présente une forte précipitation pendant toute l'année. Le développement des infrastructures routières dans cette zone littorale soulève des défis environnementaux et techniques majeurs. L'entretien et réhabilitation de ces routes qui s'y trouvent, devront faciliter la circulation par la fluidification des marchandises, les transferts et toutes formes d'échanges. Dans ce contexte, l'utilisation de matériaux alternatifs et durables pour les remblais routiers devient incontournable. Parmi ces matériaux, les débris de coquillages, tant non calcinés que calcinés, suscitent un intérêt croissant en raison de leurs propriétés mécaniques et de leur disponibilité. Cette étude se propose d'explorer l'influence de ces débris sur la performance des remblais routiers dans la zone littorale est de Madagascar, où les enjeux écologiques et économiques se croisent. En intégrant ces déchets marins dans la conception des infrastructures, il devient possible non seulement de valoriser des ressources locales, mais aussi de réduire l'empreinte écologique liée aux matériaux de construction traditionnels. Des matériaux de construction routière pourront être trouvés localement, d'autres pourront être disponibles dans d'autres sites pour la stabilisation et traitement des sols in-situ destinés dans la construction des routes en terre. Plusieurs ressources peuvent-être donc utilisées si elles répondent aux critères d'utilisation dans les travaux de remblais et des terrassements de ces routes non revêtues. Par ailleurs, cette recherche vise à analyser les implications techniques, environnementales et socio-économiques de l'utilisation de ces matériaux, ouvrant ainsi la voie à des pratiques de construction plus durables et respectueuses de l'environnement dans une région à la biodiversité riche et menacée. Ainsi, nous nous proposons de valoriser des déchets riches en $CaCO_3$, source en chaux après traitement thermique, telles que les déchets de coquillages qui sont en abondance dans la zone d'études, pour stabiliser les sols utilisés dans la construction des routes en terre non revêtues. C'est dans cette optique que nous avons avancé l'étude intitulé : « ***Étude de l'influence des débris de coquillages non calcinés et calcinés sur les remblais routiers de la zone littorale EST de Madagascar*** ».

II. MATERIELS ET METHODES

II.1. Provenance et présentation des matériaux

II.1.1 Échantillons de sols

Les échantillons de sols ont été prélevés sur 2 sites différents à proximité de la route nationale numéro 5 (sur Ambodiatafana, et sur Ambinany Sahavary), au bord des tronçons où les routes sont en très mauvais état et présentent des déformations importantes.

International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2024 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/
Vol. 46 No. 2 September 2024, pp. 61-82

Tableau 1 : site de prélèvement des échantillons de sol

Désignation	Site de prélèvement	Coordonnés GPS
Sol 1	Site 1 : Ambodiatafana	S.17°95'03.2'' et E.49°43'70.4''
Sol 2	Site 2 : Ambinany Sahavary	S.18°85'54.3''et E.49°47'16.5''

Ils ont été prélevés jusqu'à 1m de profondeur, pour exclure les matières organiques. Les sols prélevés sont mis en sac hermétiques pour garder la teneur en eau naturelle, puis ils sont ramenés aux laboratoires pour les analyses de laboratoires: Laboratoire BTP de l'École Supérieure Polytechnique d'Antananarivo (ESPA), Laboratoire des Matériaux de l'ESPA, Laboratoire LNTB Antananarivo, et laboratoire CNRIT d'Antananarivo (Centre National de Recherches Industriels et Technologiques).

***Photo 1.a :** Échantillon de sol 1*

***Photo 1.b :** Échantillon de sol 2 (Source : Auteur)*

II.1.2 Débris de coquillages

Les débris de coquillages que nous avons utilisés proviennent sur les côtes et au bord de la mer de la zone d'étude.

***Photo 2.a :** Échantillon de coquillage*

***Photo 2.b :** Échantillon de coquillage broyé (Source : Auteur)*

II.2. Préparation des matériaux d'expérimentation

II.2.1 Préparation des échantillons de sol

- Séchage : les échantillons sont d'abord débarrassés de ses impuretés (gros grains supérieurs à 2 cm, et des autres débris végétaux), puis ils sont séchés à l'air libre, protégé de l'humidité.
- Broyage : ils sont broyés manuellement et ramenés à une granulométrie inférieure à 400µm (ou 0,4 mm) en utilisant un tamis d'ouverture normalisé (Norme AFNOR)

International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2024 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/
Vol. 46 No. 2 September 2024, pp. 61-82

II.2.2 Préparation des poudres de coquillages

- Lavage et séchage: les débris de coquillages sont lavés séchés, on enlève tous ceux qui ne sont pas coquillages (boues, débris, restes de chaires etc.)

II.2.2.1 Préparation de la poudre non calcinée :

- Broyage : les coquillages bien lavés et séchés sont broyés à l'aide d'un broyeur à bourrelet du CNRIT jusqu'à obtention de la poudre fine (environ 2h)
- Tamisage : la poudre calcinée obtenue est tamisée à 50µm pour obtenir de la poudre très fine.

II.2.2.2 Préparation de la poudre calcinée :

- Calcination : les coquillages bien lavés et séchés sont calcinés à 800°C pendant 6 h
- Broyage : ils sont broyés ensuite à l'aide d'un broyeur à bourrelet jusqu'à obtention de la poudre fine.
- Tamisage : la poudre calcinée obtenue est tamisée à 50µm pour obtenir de la poudre calcinée très fine et pour séparer les impuretés. La poudre obtenue contient majoritairement de la CaO.

II.2.3 Étude de formulation et confection des éprouvettes d'expérimentation

Pour obtenir de la pâte homogène, les sols et les poudres sont mélangés avec de l'eau à raison de 1,4 fois la limite de liquidité du sol naturel, puis malaxés avec un agitateur électrique pendant 20 minutes. La pâte homogène est moulée dans les éprouvettes cylindre d'élancement 1 (6cm*6cm) et séchée à l'air libre. Les compositions des éprouvettes d'expérimentation avec les 2 types de sols et les 2 types de poudres seront présentées dans les tableaux suivants :

Tableau 2 : *Formulation avec de la poudre fine de coquillage calciné (PCC)*

Formulation	Quantité en masse à introduire dans le malaxeur.
Sol 1 ou Sol 2	100%
Teneur en eau (% eau=1,5ωL)	6,4%
Témoin	100% Sol (S1 ou S2)
F1 (Sol + PCC)	S1 ou S2 95% + PCC 5%
F2 (Sol + PCC)	S1 ou S2 90% + PCC 10%
F3 (Sol + PCC)	S1 ou S2 85% + PCC 15%
F4 (Sol + PCC)	S1 ou S2 80% + PCC 20%

Tableau 3 : *Formulation avec de la poudre fine de coquillage non calciné (PCNC)*

Formulation	Quantité en masse à introduire dans le malaxeur.
Sol 1 ou Sol 2	100%
Teneur en eau (% eau=1,5ωL)	6,4%
F0 (Sol + PCNC) = témoin	Pas de PCNC
F1' (Sol + PCNC)	S1 ou S2 95% + PCNC 5%

International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2024 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/
Vol. 46 No. 2 September 2024, pp. 61-82

F2' (Sol + PCNC)	S1 ou S2 90% + PCNC 10%
F3' (Sol + PCNC)	S1 ou S2 85% + PCNC 15%
F4' (Sol + PCNC)	S1 ou S2 80% + PCNC 20%

II.3 Méthodes de caractérisations des matériaux

II.3.1 Teneur en Eau (NORME : NF P 94-050)

C'est le rapport, exprimé en pourcentage du poids d'eau que le matériau contient, au poids de ses éléments secs, après dessiccation à 105°C (60°C dans le cas des sols contenant des éléments organiques) jusqu'à poids constant.

La teneur en eau représente la proportion d'eau par rapport à la masse sèche.

$$\boldsymbol{\omega\%} = \frac{\boldsymbol{Masse\ d'eau}}{\boldsymbol{Masse\ du\ sol\ sèc}} \times \mathbf{100} \quad (\text{Masse d'eau} = M_{\text{sol humide}} - M_{\text{sol sec}})$$

II.3.2 Analyse granulométrique par Tamisage (NORME : NF EN 933-1)

L´essai consiste en la détermination de la répartition des grains ayant un diamètre supérieur à 0,080mm et exprimée en pourcentage. Cette répartition est représentée en fonction du tamisât cumulé (%) ou du refus cumulé (%)

$$\textbf{Refus cumulé (\%)} = \frac{\boldsymbol{Refus\ cumulé\ en\ g}}{\boldsymbol{Ms}} \times \mathbf{100} \qquad \textbf{et} \qquad \textbf{Tamisât cumulé (\%)} = \mathbf{100} - \boldsymbol{Rf\ en}\ \%$$

Photos 3 : Série de tamis normalisé (source : Auteur)

II.3.3 Limites d'Atterberg (NORME : NF P 94-051)

Ce sont des indicateurs qualifiant la plasticité d'un sol. L'essai consiste à déterminer:

- La limite de plasticité: ωP
- La limite de liquidité : ωL
- Et l´indice de plasticité : Ip = $\omega L - \omega P$

Photos 4 : Appareil de Casagrande (source : Auteur)

International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2024 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/
Vol. 46 No. 2 September 2024, pp. 61-82

II.3.4 Essai d'identification des propriétés d'état

II.3.4.1 Poids spécifiques

C'est le rapport entre le poids et le volume exprimé en T/m^3.

$$\gamma = \frac{P}{V}$$ (P : Poids du matériau et V : Volume total)

II.3.4.2 Essais de compactage

III.3.4.2.1 Essai PROCTOR (NORME : NF P 94-093) : l'essai consiste à déterminer la densité maximale et la teneur en eau optimale Proctor pour obtenir le compactage maximal.

III.3.4.2.2 Essai CBR (NORME : NF P 94-078) : l´essai consiste à déterminer le poinçonnement du sol, c´est à dire l'indice portant du sol en le compactant à la teneur en eau optimale PROCTOR.

II.3.5 Les essais mécaniques

II.3.5.1 Essai de compression (Norme NF EN 12390-4)

L´essai de compression consiste à mesurer la résistance à la compression d'un matériau sur une machine d'essai mécanique suivant un protocole normalisé. Cet essai consiste à appliquer un effort de compression sur un échantillon reposant sur une surface indéformable. Cette sollicitation provoque un écrasement de l'éprouvette.

On mesure simultanément les contraintes et déformations au cours de l'essai.

Photos 5 : ***Appareil d'essais de compression (Source : Auteur)***

II.3.5.2 Essai pressiométrique (Norme NF P 94-110)

L'essai pressiométrique est un essai géotechnique in situ, dont le principe consiste à mesurer les déformations et la rupture du sol par l'intermédiaire d'une sonde gonflée à l'azote. Il sert à identifier les paramètres intrinsèques du comportement d'un sol. Cet essai est réalisé dans un forage destructif préalable dont le diamètre est de 64 mm maximum.

III. RESULTATS ET DISCUSSIONS

III.1 Caractéristiques des fosses pédologiques de prélèvement de S1 et S2

Nous présentons dans le tableau suivant la texture des sols à partir du niveau zéro à 1m de profondeur

International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2024 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/
Vol. 46 No. 2 September 2024, pp. 61-82

Tableau 4 : Nature des sols

Profondeur (m)	Sol 1	Sol 2
0,00 - 0,45	Limon Argileux sableux	Argile sableuse
0,50 - 0,75	Légèrement sableuse	Dominance sableuse
0,75 – 1,00	Avec sable grossier	Sable grossier

III.1.1 Présence des eaux de profondeur (nappe)

Des eaux en profondeurs ont été localisées au moment de l´investigation :

- **Site 1 : Ambodiatafana (Sol 1)** : vers 0,85m de profondeur ;
- **Site 2 : Ambinany Sahavary (Sol 2)** : vers 0,65m de profondeur.

III.1.2 Paramètres pressiométriques

Les essais pressiométriques ont été réalisés dans un milieu imperméable sous la nappe et non drainé ont donné les valeurs montrées dans le tableau suivant :

Tableau 5 : Paramètres pressiométriques

		Site N°1		Site N°2	
Profondeur (m)		**E (MPa)**	**Pl (MPa)**	**E (MPa)**	**Pl (MPa)**
0,00 - 0,45	**Essai 1**	1,69	0,29	1,09	0,16
	Essai 2	1,68	0,28	1,02	0,21
0,50 - 0,75	**Essai 3**	6,98	0,52	5,51	0,36
	Essai 4	6,88	0,62	5,64	0,53
0,75 – 1,00	**Essai 5**	15,04	1,28	3,97	0,61
	Essai 6	15,16	1,37	4,02	1,06

E (MPa) *étant le module d'Young et* ***PI*** *les paramètres pressiométriques*

Les paramètres pressiométriques varient d'un site à l'autre et d'une profondeur à l'autre. Sur les deux sites, on a noté les valeurs maximales à 1m de profondeur, elles sont de 1,37 MPa pour S1 et 1,06 MPa pour S2.

III.2. Caractéristiques des échantillons de sol S1 et S2

III.2.1 Résultats de l'analyse granulométrique par tamisage

Les résultats des essais sont présentés dans le tableau et figure ci-dessous :

International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2024 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/
Vol. 46 No. 2 September 2024, pp. 61-82

Tableau 6 : Analyse granulométrique des sols

Désignation	Ouverture des tamis (mm)/Passant cumulé (%)						
	41	38	34	32	29	26	20
Passant cumulé (%) de S1	-	-	100	97	78	72	62
Passant cumulé (%) de S2	-	100	99	95	80	75	68

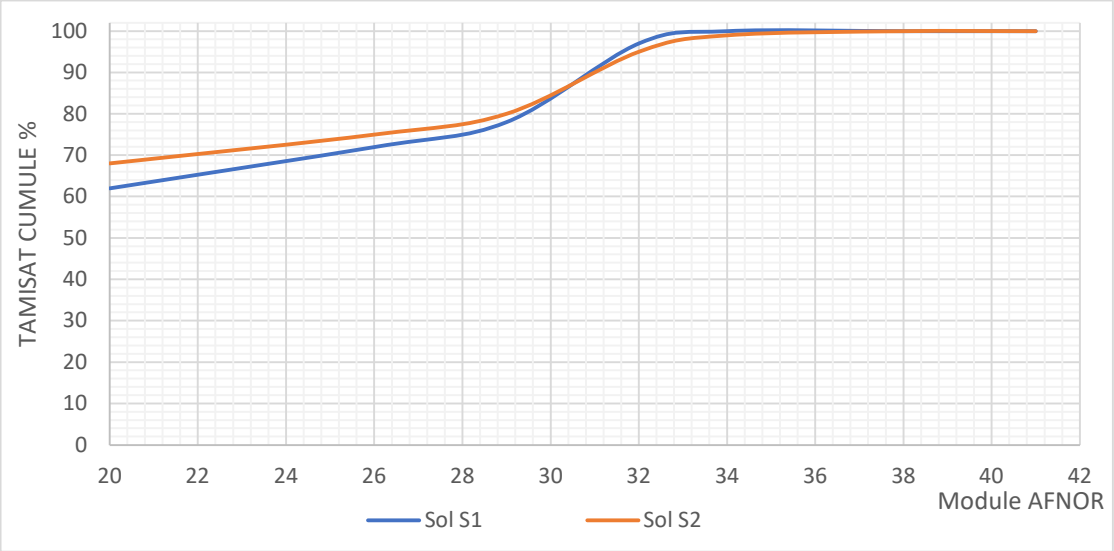

Figure 1 : ***courbes granulométriques des échantillons de sols***

III.2.2 Limites d'Atterberg

L'essai consiste à déterminer la plasticité du sol en tenant compte de la limite de liquidité (ω L) et la limite de plasticité (ω P) selon la norme **NF EN ISO 17892-12**

Le tableau suivant montre les résultats obtenus :

Tableau 7 : Limites d'Atterberg

Désignation	ωL (%)	ωP (%)	I_P (%)
Sol S1	46,7	32,8	14
Sol S2	48,2	30,2	18

III.2.3 Les caractéristiques physiques

Les caractéristiques physiques des échantillons de sols sont présentées dans le tableau ci-dessous :

International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2024 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/
Vol. 46 No. 2 September 2024, pp. 61-82

Tableau 8 : Caractéristiques physiques

Désignation	Texture	ω (%)	Poids volumique sec (KN/m^3)
Sol S1	Limon argileux légèrement sableux	16,6	15,56
Sol S2	Argile sableuse	20,3	15,83

III.2.4 Classification des sols

Selon les caractéristiques des sols, on peut déduire leur classification GTR.

Tableau 9 : Classification des échantillons de sol

Désignation	Nature des sols selon Ip	Classification **GTR**
Sol S1	Sol plastique	A2th
Sol S2	Sol plastique	A2th

GTR : *Guide des Terrassements routiers]*

III.2.5 Essais de compactage PROCTOR et Essai de portance CBR

Les valeurs des optimums Proctor, des ICBR, du gonflement relatif des échantillons de sols étudiés sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau 10 : Proctor et portance ICBR

Désignation	Essai PROCTOR		Essai CBR à 95% OPM	
	γ_d Opt (KN/m^3)	ω Opt (%)	Indice CBR (4j immersion)	Gonflement (%)
Sol S1	17,75	16,3	28	0,23
Sol S2	16,80	23,9	16	0,30

III .3. Caractéristiques des éprouvettes d'expérimentation

III.3.1 Poids volumiques des éprouvettes stabilisées

Tableau 11 : variation des poids volumiques des éprouvettes avec les poudres calcinées et non calcinées

Désignation	Formulation	γ_d (KN/m^3) avec PCC	γ_d (KN/m^3) avec PCNC
Sol S1	Témoin	15,56	15,56
	F1	17,27	17,16
	F2	17,37	17,29
	F3	17,67	17,47
	F4	17,47	17,36

International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2024 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/
Vol. 46 No. 2 September 2024, pp. 61-82

Sol S2	Témoin	15,83	15,83
	F1’	16,37	15,92
	F2’	16,47	15,97
	F3’	16,52	16,07
	F4’	16,50	16,00

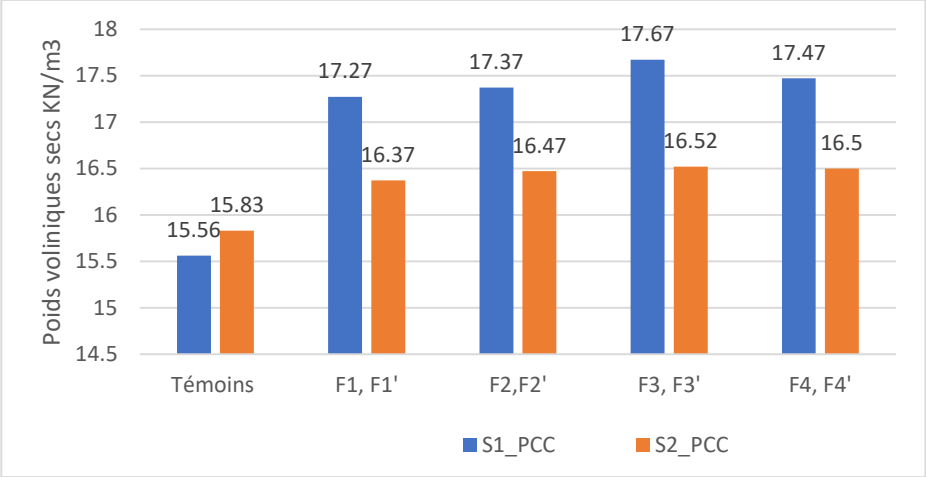

Figure 2 : *Variation des poids volumiques des sols stabilisés aux PCC*

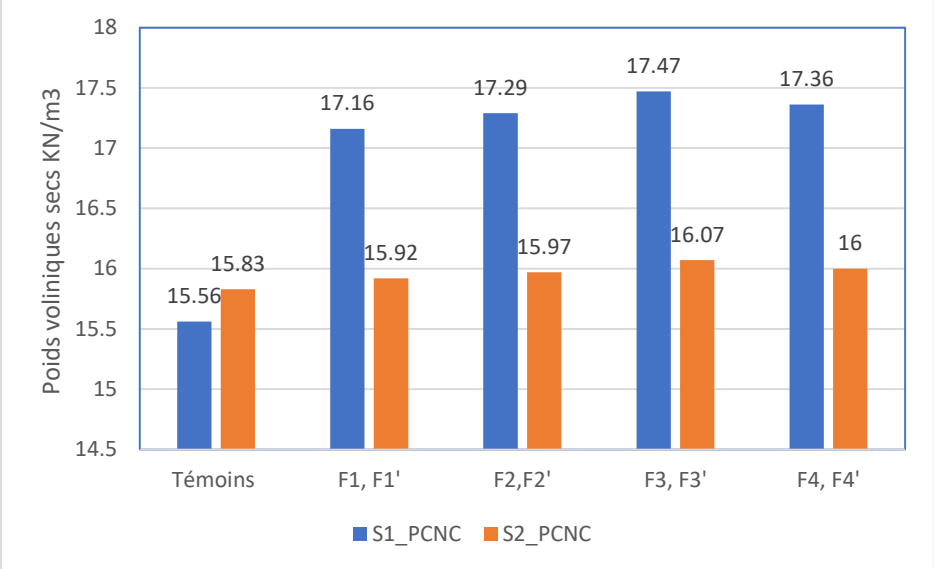

Figure 3 : *Variation des poids volumiques des sols stabilisés aux PCNC*

International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2024 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/
Vol. 46 No. 2 September 2024, pp. 61-82

III.3.2 Résultats des essais de compactage

III.3.2.1 Comportement des éprouvettes avec PCC

Tableau 12 : Essai Proctor, Indice de portante et Gonflement relatif des SOL + PCC

Désignation	Formulation	Essai PROCTOR		Essai CBR à 95% OPM	
		γ_d Opt (KN/m^3)	ω Opt (%)	Indice CBR (4j immersion)	Gonflement (%)
Sol S1	Témoin	17,75	16,3	28	0,23
	F1	18,12	16,2	29	0,21
	F2	18,28	15,7	40	0,12
	F3	18,56	14,3	52	0,06
	F4	18,86	14,0	42	0,10
Sol S2	Témoin	16,80	23,9	16	0,30
	F1’	17,21	17,4	19	0,27
	F2’	17,46	17,2	30	0,22
	F3’	17,67	17	42	0,05
	F4’	17,69	16,8	30	0,15

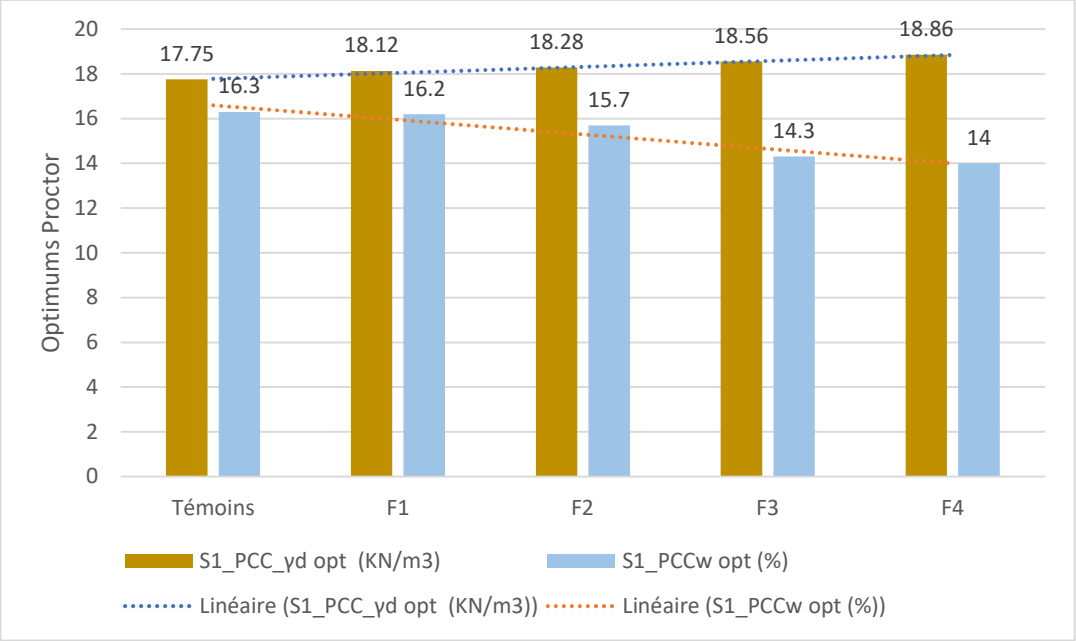

***Figure 4 :** Variation des optimums Proctor des éprouvettes de S1 avec PCC*

International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2024 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/
Vol. 46 No. 2 September 2024, pp. 61-82

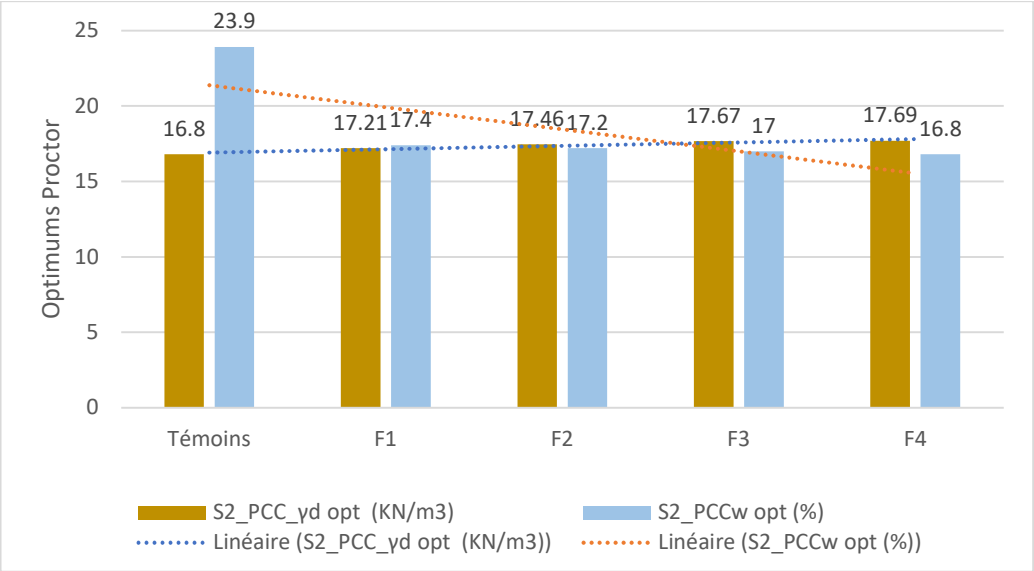

Figure 5 : ***Variation des optimums Proctor des éprouvettes de S2 avec PCC***

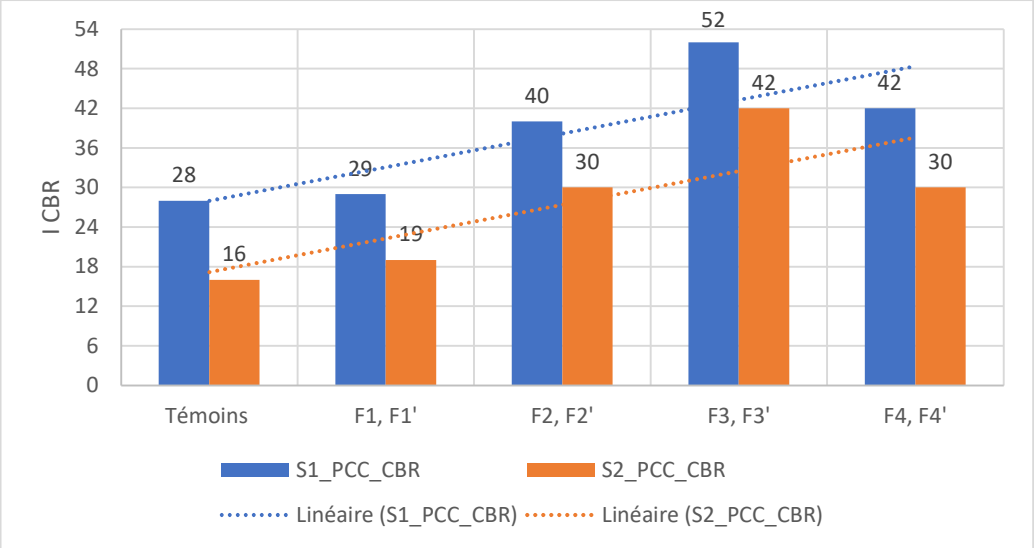

Figure 6 : ***Évolution des ICBR des sols stabilisés avec le % de PCC***

International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2024 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/
Vol. 46 No. 2 September 2024, pp. 61-82

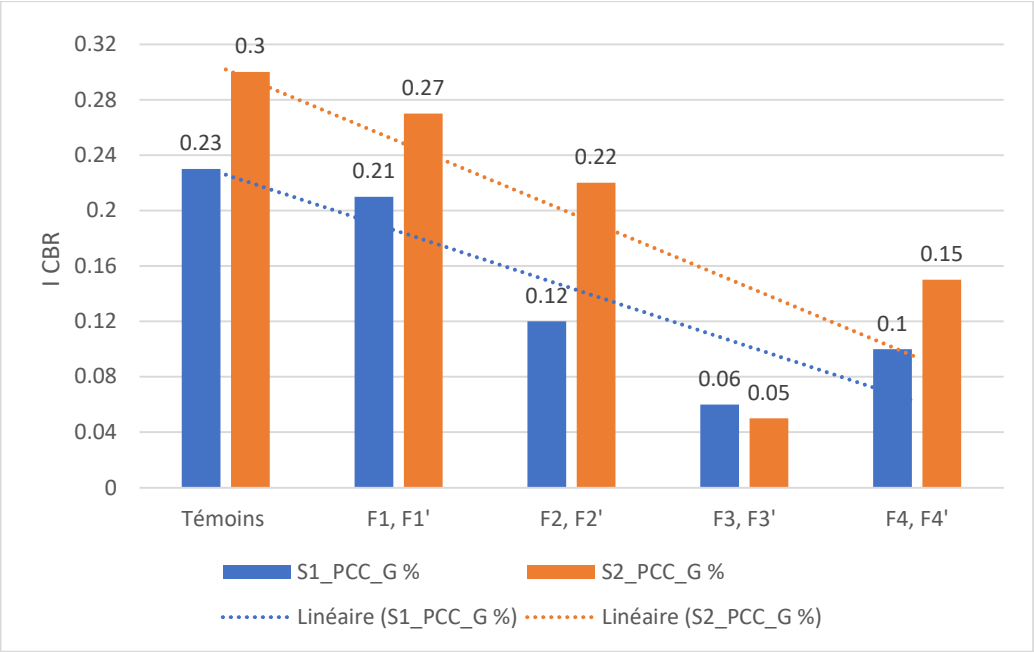

Figure 7 : Évolution des gonflements relatif des sols stabilisés avec le % de PCC

III.3.2.2 Comportement des éprouvettes avec PCNC

Tableau 13 : Essai Proctor, Indice de portance et Gonflement relatif des SOL + PCNC

Désignation	Formulation	Essai PROCTOR		Essai CBR à 95% OPM	
		γ_d Opt (KN/m^3)	ω Opt (%)	Indice CBR (4j immersion)	Gonflement (%)
S1	Témoin	17,75	16,3	28	0,23
	F1	18,65	14,8	28	0,25
	F2	18,60	15,0	37	0,18
	F3	18,20	15,5	50	0,13
	F4	18,40	15,8	42	0,21
S2	Témoin	16,80	23,9	16	0,30
	F1’	16,80	18,2	15	0,39
	F2’	16,85	18,5	26	0,28
	F3’	16,87	18,9	38	0,10
	F4’	16,80	18,4	30	0,15

International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2024 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/
Vol. 46 No. 2 September 2024, pp. 61-82

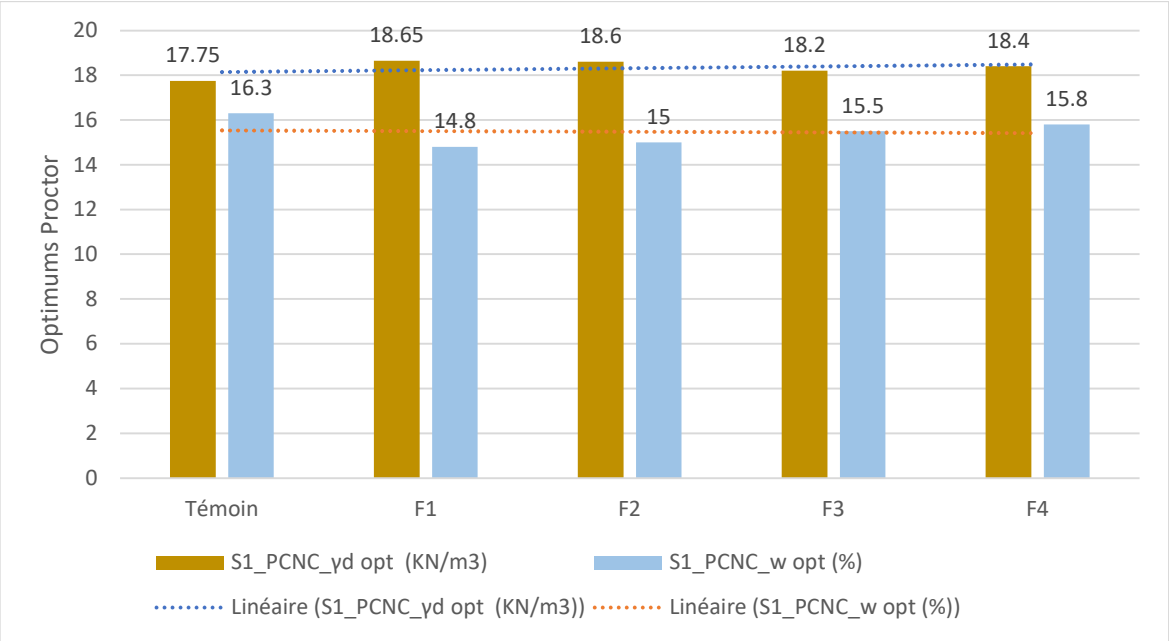

Figure 8 : *Variation des optimums Proctor des éprouvettes de S1 avec PCNC*

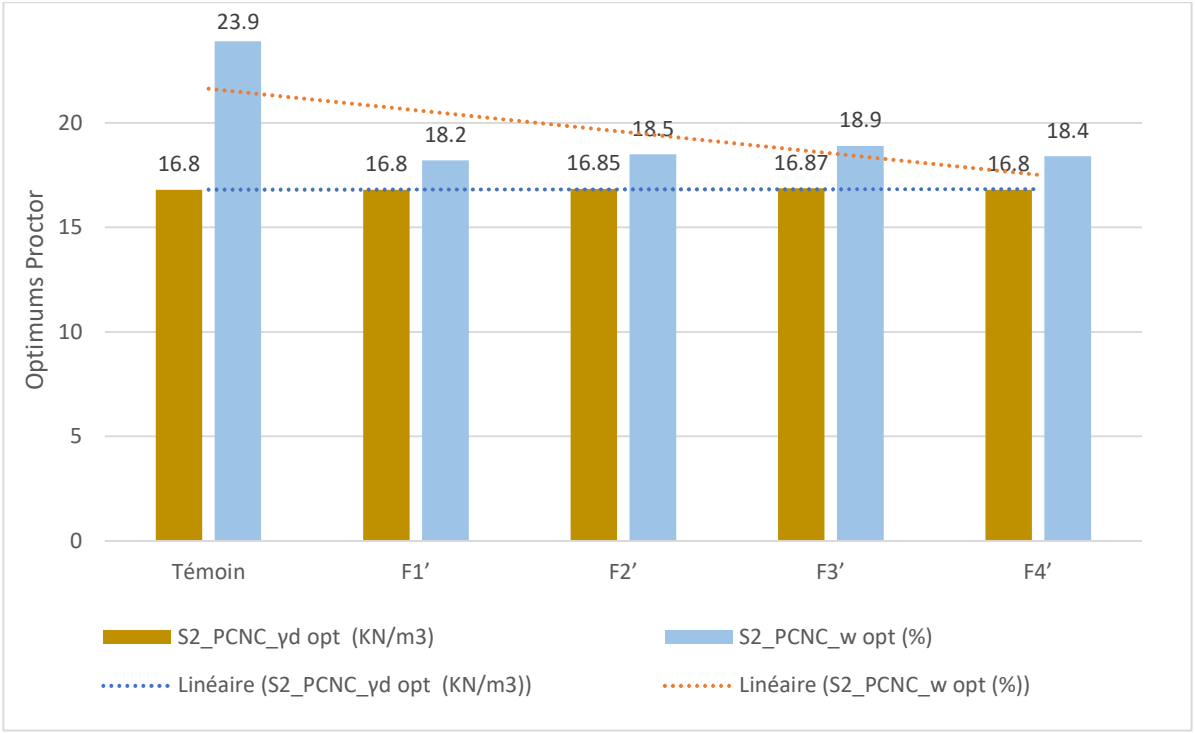

Figure 9 : *Variation des optimums Proctor des éprouvettes de S2 avec PCNC*

International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2024 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/
Vol. 46 No. 2 September 2024, pp. 61-82

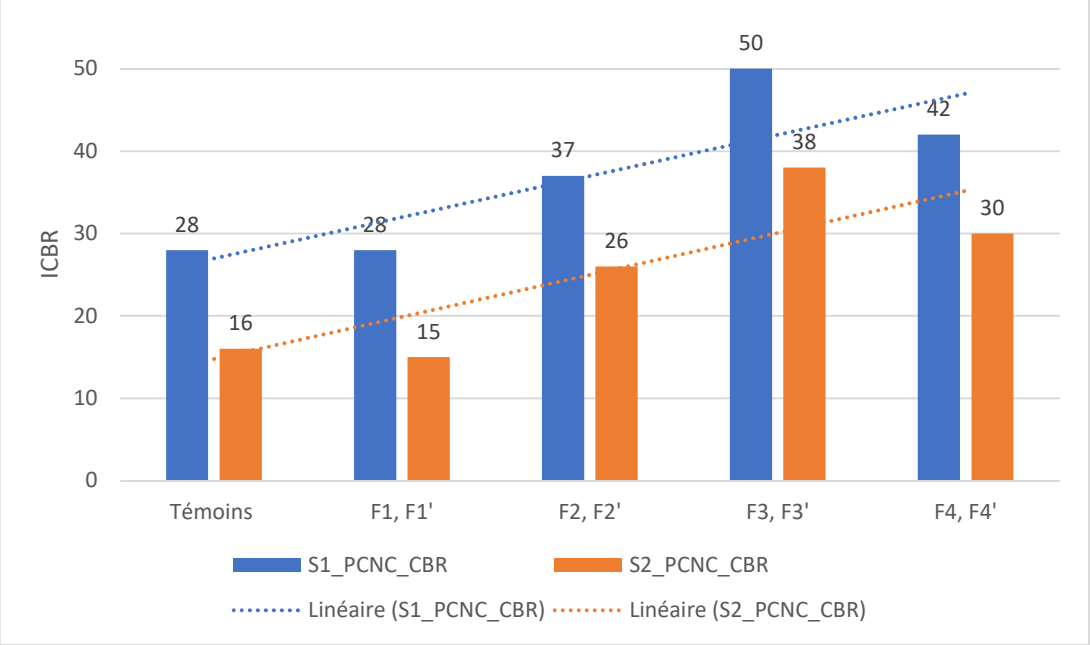

Figure 10 : Évolution des ICBR des sols stabilisés avec le % de PCNC

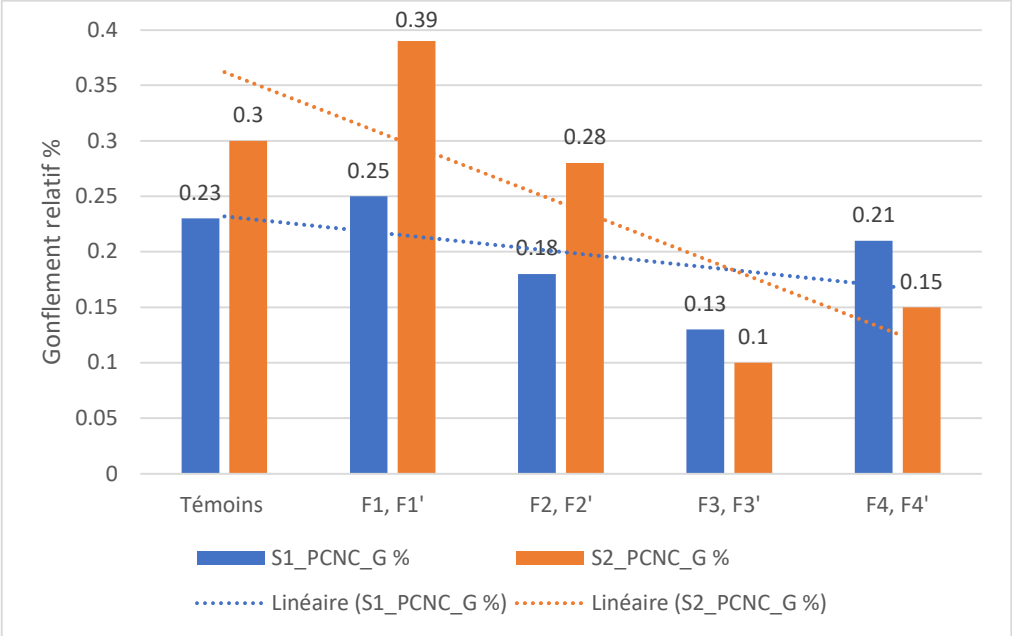

Figure 11 : Évolution des gonflements relatifs des sols stabilisés avec le % de PCNC

III.3.3 Valeurs de la compacité

C'est le rapport entre Densité sèche (γd CBR) et la Densité optimale Proctor (γd_{opt} Proctor).

International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2024 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/
Vol. 46 No. 2 September 2024, pp. 61-82

Tableau 14 : Valeurs de la compacité

Désignation	Formulation	Compacité % + PCC	Compacité % + PCNC	Spécification
Sol S1	Témoin	93,95	93,95	>95
	F1	95,94	96,09	
	F2	95,97	96,08	
	F3	96,06	95,99	
	F4	95,99	96,03	
Sol S2	Témoin	93,40	93,40	
	F1’	95,73	95,65	
	F2’	95,73	95,67	
	F3’	95,71	95,63	
	F4’	95,73	95,65	

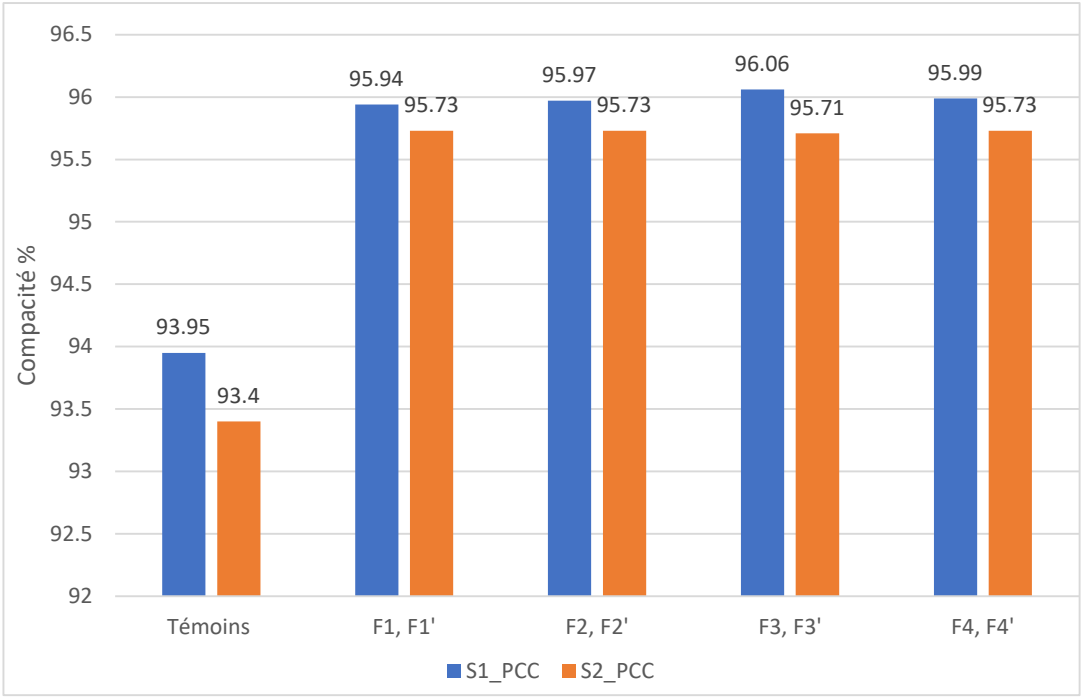

***Figure 12 :** Variation de la compacité des sols stabilisés avec de PCC*

International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2024 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/
Vol. 46 No. 2 September 2024, pp. 61-82

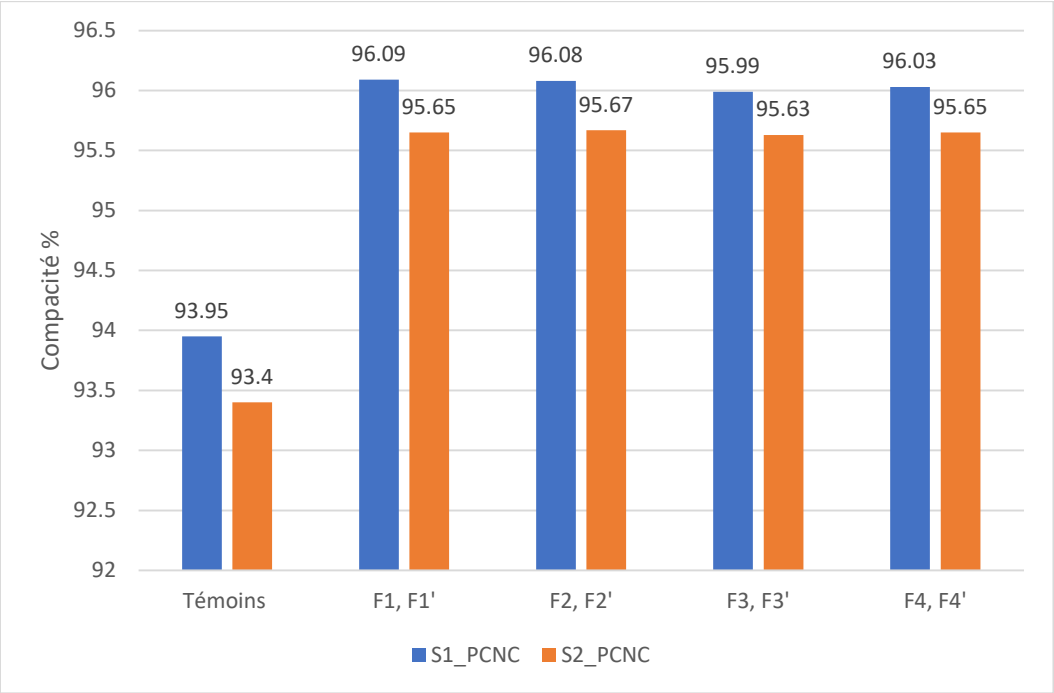

Figure 13 : ***Variation de la compacité des sols stabilisés avec de PCNC***

III.3.4 Valeurs de la résistance à la compression

C'est le rapport entre la force maximale appliquée (F max) et la surface de la section transversale du sol stabilisé (A).

Tableau 15 : Valeurs de la Résistance à la compressions (Rc)

Désignation	Formulation	**Rc en MPa + PCC**	**Rc en MPa + PCNC**
Sol S1	Témoin	1,22	1,22
	F1	1,34	1,24
	F2	2,17	1,57
	F3	3,36	1,89
	F4	2,89	1,88
Sol S2	Témoin	0,95	0,95
	F1'	1,53	1,23
	F2'	1,81	1,41
	F3'	2,21	1,71
	F4'	2,13	1,81

International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2024 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/
Vol. 46 No. 2 September 2024, pp. 61-82

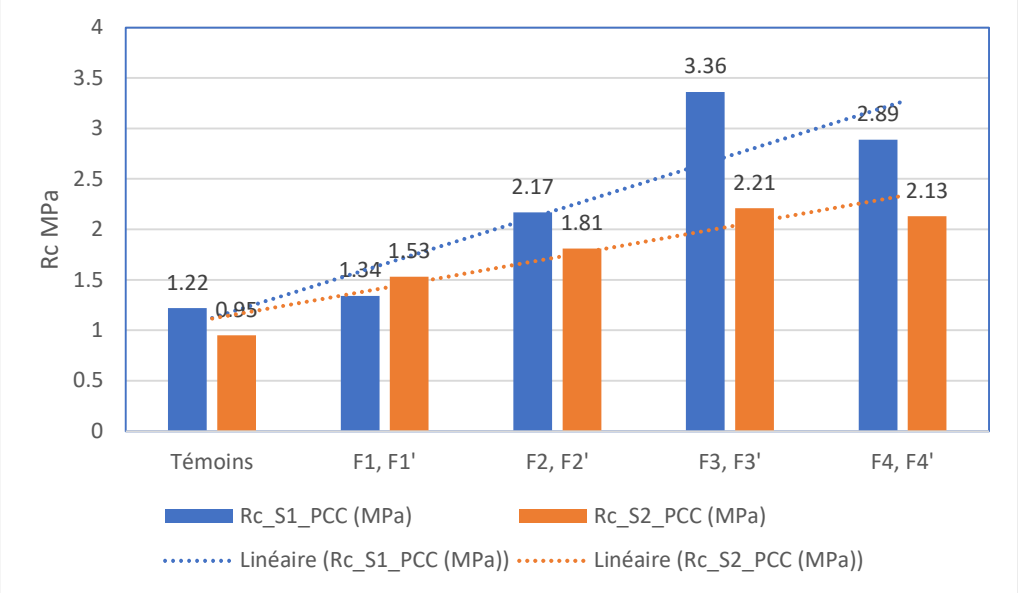

Figure 14 : ***Variation de la Rc des sols stabilisés avec de PCC***

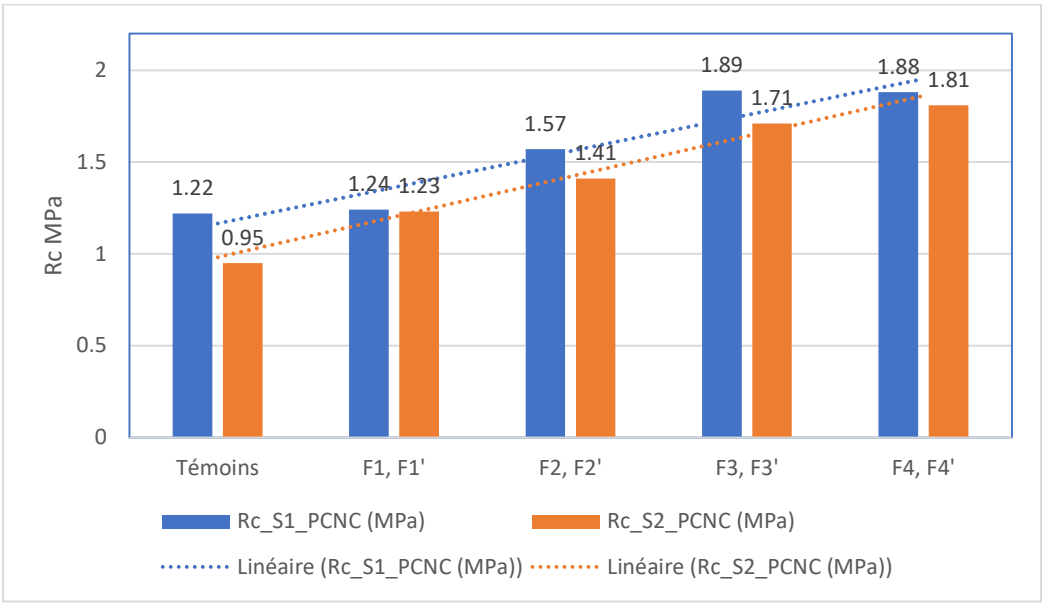

Figure 15 : ***Variation de la Rc des sols stabilisés avec de PCNC***

III.4 Discussions

III.4.1 Caractéristiques des matériaux d'expérimentation

- **Texture**: Le Sol 1 prélevé sur le site d'Ambodiatafana, étant argileux légèrement sableux, présente un meilleur drainage et moins de plasticité que le Sol 2 du site d'Ambinany, qui est argile sableuse. Cela peut rendre le Sol 1 plus stable sous des charges, en raison du sable qui aide à réduire la compressibilité.

- Paramètres pressiométriques: Le Sol 1 a un paramètre pressiométrique de 1,37 MPa, plus élevé que celui du Sol 2 (1,06 MPa). Cela indique une plus grande résistance à la déformation et à la compression, ce qui est favorable pour des applications de construction.

- Plasticité: Les deux sols sont plastiques, ce qui signifie qu'ils peuvent déformer sous charge. Cependant, la proportion de sable dans le Sol 1 pourrait lui conférer une meilleure gestion des forces appliquées sans déformation excessive.

- Gonflement relatif: Le Sol 1 présente un gonflement relatif plus faible (0,23%) par rapport au Sol 2 (0,30%). Un gonflement plus élevé dans le Sol 2 signifie qu'il pourrait être plus susceptible de se dilater sous des variations d'hydratation, ce qui peut être problématique dans les constructions.

- CBR après immersion: Le CBR du Sol 1 (28%) est supérieur à celui du Sol 2 (16%), indiquant une meilleure capacité portante et une résistance à la déformation après immersion. Cela le rend plus approprié pour les projets d'infrastructure, notamment les routes.

En résumé, le Sol 1 possède des caractéristiques qui favorisent sa stabilité et sa capacité portante par rapport au Sol 2. Ses propriétés de gonflement et de CBR suggèrent qu'il sera moins problématique pour les projets de construction, tandis que le Sol 2 pourrait nécessiter des traitements ou une attention particulière lors de son utilisation en ingénierie géotechnique en raison de son plus fort potentiel de gonflement et de sa moindre résistance.

III.4.2 Présence des eaux de profondeur faibles

La construction de la route RN5 sur des sols présentant des eaux de profondeur faibles (Site 1 : Ambodiatafana vers 0,85m de profondeur, et Site 2 : Ambinany Sahavary, vers 0,65m de profondeur) explique les différentes déformations et dégradations sur les routes. Voici quelques-uns des principales causes associées à ces dégradations:

- Instabilité des sols : La présence d'eau peut rendre le sol instable. L'eau peut saturer le sol, diminuant sa capacité portante et augmentant le risque de glissements de terrain, d'affaissements ou d'érosion.

- Problèmes de drainage : La construction d'une route peut perturber le drainage naturel des terres environnantes. Si les eaux de surface ou souterraines ne sont pas correctement gérées, cela peut entraîner des inondations ou des stagnations d'eau, affectant non seulement la route, mais aussi les terrain terrains environnants.

- Formation de cavités et affaissements : L'extraction ou la variation des niveaux de nappe phréatique peut créer des cavités souterraines, ce qui peut conduire à des affaissements localisés de la chaussée.

- Impact sur les infrastructures : L'eau peut endommager les infrastructures routières, comme les fondations et les revêtements, entraînant des réparations fréquentes et une durée de vie réduite de la route.

Pour remédier, des mesures devront être considérées pour assurer la durabilité de ces routes, entre autres, la mise en place des gestion adaptées pour le drainage et la protection des écosystèmes environnants, le traitement et stabilisation des sols de remblais. Dans cet article, notre étude contribue aux stabilisations et traitement des sols de remblais en valorisant des ressources riches en $CaCO_3$ pour produire de la chaux CaO, un liant hydraulique alternatif.

III.4.3 Caractéristiques des éprouvettes d'expérimentation

III.4.3.1 Caractéristiques des éprouvettes stabilisées avec les PCC

Les essais au laboratoire montrent que les formulation F3 pour le sol S1 et F3' pour le sol 2 montrent des bons résultats sur l'amélioration des caractéristiques des sols étudiés. L'analyse des résultats présentés pour la stabilisation des sols avec de la poudre fine de coquillage calcinée permet d'observer des valeurs significatives sur les propriétés physiques et mécaniques des sols étudiés. Ces observations sont notées sur les paramètres suivants

- **Augmentation de la densité :** les deux sols montrent une augmentation significative de la densité après stabilisation. C'est un indicateur typique que la poudre calcinée a été efficace pour compacter le sol et améliorer sa stabilité. Pour le Sol 1, les poids volumiques secs passent de 15,56 à 17,67 kN/m³, et pour le Sol 2, de 15,83 à 16,52 KN/m³. Cette augmentation de la densité indique une meilleure performance des sols stabilisés.

- Amélioration de l'indice CBR : l'indice CBR (California Bearing Ratio) est une mesure de la résistance portante du sol. Un ratio d'indice CBR plus élevé indique une capacité plus grande du sol à supporter des charges. Le Sol 1 affiche un CBR de 52, tandis que le Sol 2 montre 42. Le Sol 1, bien qu'ayant une meilleure valeur de CBR, montre que la stabilisation a été bénéfique pour les deux types de sols, mais plus prononcée pour le Sol 1. Cela suggère une plus grande efficacité de la poudre de coquillage calcinée dans la stabilisation des sols à texture limoneuse.

- Gonflement relatif : le gonflement relatif est un indicateur important du comportement du sol face aux variations d'humidité. Un gonflement faible est souhaitable pour une bonne stabilité des structures. Les valeurs observées (0,06 pour le Sol 1 et 0,05 pour le Sol 2) sont toutes deux faibles, indiquant que la stabilisation a réussi à réduire le potentiel de gonflement des sols, ce qui est essentiel dans des applications de construction.

- Resistance à la compression : La plus forte valeur de résistance à la compression (3,36 MPa) indique que le sol limon argileux sablonneux, lorsqu'il est traité avec de la poudre de coquillage, a une meilleure capacité portante que le sol argilo-sableux avec une résistance de 2,21 MPa. Cela pourrait indiquer que le traitement avec la poudre de coquillage est plus efficace sur le sol limon argileux sablonneux, ou que la composition du sol limon argileux est intrinsèquement plus adaptée aux améliorations par le traitement.

III.4.3.2 Caractéristiques des éprouvettes stabilisées avec les PCNC

Pareillement aux essais avec les poudres fines de coquillages finement broyés, les formulation F3 et F3’ donnent des bons résultats sur les paramètres suivants :

- Densité: La densité du Sol 1 (17,47) après stabilisation est supérieure à celle du Sol 2 (16,07). Cela peut être dû à la composition de la poudre de coquillage broyée non calcinée, qui pourrait augmenter la compacité du sol en raison de ses propriétés gravitaires, ou à d'autres caractéristiques géométriques de la poudre.

- Indice CBR: L'Indice CBR (California Bearing Ratio) est un indicateur de la capacité portante du sol. Ici, le Sol 1 présente un Indice CBR de 50, contre 38 pour le Sol 2. Cela signifie que le Sol 1 stabilisé avec la poudre broyée non calcinée est plus résistant à la déformation et au chargement que le Sol 2, stabilisé avec la poudre calcinée. Cela peut suggérer que la poudre non calcinée a une meilleure performance pour des applications structurelles.

- Gonflement Relatif: Le gonflement relatif est une mesure de la sensibilité d'un sol à l'humidité. Un gonflement de 0,13 pour le Sol 1 est plus élevé que le 0,10 du Sol 2, indiquant que le Sol 1 pourrait être plus susceptible au gonflement en présence d'eau. Cela pourrait être dû à la nature du sol limon argileux qui a des propriétés plus expansives comparées à l'argile sableuse du Sol 2.

III.4.3.3 Comparaison des effets de ces 2 types de poudres

- Densité: dans les deux sols, la poudre calcinée entraîne une densité plus élevée par rapport à la poudre non calcinée. Cela indique que la poudre calcinée améliore la compacité du sol et potentiellement la résistance du mélange.

- Indice CBR: L'Indice CBR est un indicateur clé de la capacité des sols à supporter le trafic routier. Dans le Sol 1, l'utilisation de la poudre calcinée (CBR = 52) surpasse celle de la poudre non calcinée (CBR = 50), montrant un meilleur comportement mécanique. Pour le Sol 2, le même scénario se reproduit, avec CBR de 42 pour la poudre calcinée et 38 pour le non calciné. Cela montre que la poudre calcinée améliore également la résistance à la pénétration, étant un meilleur stabilisateur que le non calciné pour les deux sols.

International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2024 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/
Vol. 46 No. 2 September 2024, pp. 61-82

- Gonflement relatif: Le gonflement relatif est un critère important, car un faible gonflement est souvent préférable pour la stabilité des sols. Pour le Sol 1, la poudre calcinée (0,06) offre moins de gonflement que la non calcinée (0,13). Une tendance similaire est observée dans le Sol 2, où le gonflement est moindre avec la poudre calcinée (0,05) comparativement à la non calcinée (0,10). Cela suggère que la poudre calcinée, en raison de ses propriétés chimiques et physiques, contribue à réduire la plasticité et le potentiel de gonflement des sols.

- Résistance à la compression : Les sols stabilisés avec les poudres de coquillages calcinées (PCC) présentent une résistance à la compression supérieure à celle des sols stabilisés avec poudres de coquillages broyés non calcinés (PCNC). Les valeurs pour S1 et S2 sont toutes deux plus élevées dans le cas des coquillages calcinés. La différence entre les résistances de S1 et S2 est notable suivant la texture des sols mais moins prononcée que dans le cas des coquillages calciné et broyés non calcinés. Cela pourrait indiquer une variation de résultat dans le processus de stabilisation. La différence de résistance peut être influencée par plusieurs facteurs, tels que la granulométrie du sol, la distribution des particules, la teneur en eau et la manière dont la poudre de coquillage interagit avec la matrice du sol.

Les sols argilo-sableux peuvent avoir des propriétés mécaniques différentes des sols limon argileux sablonneux, ce qui peut affecter leur comportement sous chargement.

IV. CONCLUSION

Chaque année, les routes dans la zone littorale Est de Madagascar ne résistent pas aux intempéries : elles se dégradent très facilement et deviennent impraticables pendant et après chaque saison de pluies. Cette dégradation répétée de façon intense constitue l'un des facteurs majeurs de blocage sur les moyens de transports agricoles, économiques et touristiques. Toutefois, des travaux de réhabilitation et de nouvelles constructions sont régulièrement réalisés, mais les routes perdent constamment leur performance non seulement au passage des trafics lourds mais surtout au passage des cyclones et des fortes crues. Des nouveaux remblais et des nouveaux matériaux ont toujours été apportés pour la réalisation des différentes couches mais elles restent temporaires. Les routes se dégradent facilement pendant et après la saison de pluie à cause perte de la perméabilité suivant les facteurs climatiques comme proximité des océans, altitude, précipitation, courant océanique et ainsi les activités humaines comme feux de brousse. Les matériaux des différentes couches actuelles ne répondent pas aux normes de spécifications car l'altitude de la route littorale est basse, proximité des océans ce qui provoque l'abondance des eaux souterrains, abondance de salinité d'où le mal adhérence des matériaux. La mise en œuvre de la construction routière appliquée de cette zone n'est pas fiable car beaucoup des paramètres n'ont pas été respecté comme le test d'adhérence, étude de la propriété chimique de la zone à construire. De plus les suivies et contrôle qualité souvent ne sont pas pris en compte dans le cahier de charge et l'entretien périodique sont très rare ou peut-être jamais si la route n'est pas coupée. Beaucoup d'hypothèses pourraient être établis sur les causes des dégradations routières. La stabilisation des sols avec de la poudre fine de coquillage calcinée est globalement avantageuse, entraînant une augmentation de la densité, une amélioration significative de la résistance portante (indice CBR) et une réduction du gonflement relatif. Les résultats indiquent que cette méthode de stabilisation est efficace, avec des résultats plus marqués pour le Sol 1. Ces propriétés améliorées peuvent contribuer à améliorer la durabilité et la performance des infrastructures construites sur ces sols. Ainsi, l'utilisation de la poudre calcinée de coquillage peut être une option pertinente pour la stabilisation des sols dans des projets d'ingénierie civile. L'utilisation de poudre de coquillage calcinée et non calcinée pour la stabilisation a des effets significatifs sur les propriétés des sols. En pratique, le choix entre l'utilisation de la poudre calcinée ou non calcinée devrait prendre en compte l'application prévue, notamment les conditions d'humidité attendues et les exigences de charge portante du projet. La stabilisation des sols avec de la poudre fine de coquillage broyée, qu'elle soit calcinée ou non, améliore la densité, l'Indice CBR et réduit le gonflement relatif par rapport aux sols non stabilisés. Cependant, la poudre calcinée se révèle être plus efficace que le non calciné sur les deux types de sol étudiés, offrant une densité plus élevée, un meilleur Indice CBR et un gonflement réduit. Par conséquent, pour les applications nécessitant une meilleure performance mécanique et une réponse minimaliste en termes de gonflement, il est recommandé d'utiliser la poudre calcinée et d'améliorer les conditions de compactage.

REFERENCES

[1] MAGNAN (J.-P). Revue de janv.-fév.1980 – *Classification géotechnique des sols.*1. À propos de la classification LPC. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, no 105

[2] LCPC-SETRA. Bagneux. 1992 – *Réalisation des remblais et des couches de forme. Guide technique.* Fascicule 1: Principes généraux, 98 p. Fascicule 2 : Annexes techniques, 101 p. Laboratoire central des ponts et chaussées, Paris et Service d'études techniques des routes et autoroutes.

[3] HALPHEN (B.) et HUET (C.). 1979 – Cours de matériaux de construction. Déformabilité, ENPC,

[4] Fondations stabilisées au ciment - Classification, Fabrication, Domaines d'emploi Bulletin n° 11 Bruxelles : Fédération de l'Industrie Cimentière (FIC), 1983

[5] Jean BERTHIER- Entretien préventif du réseau routier national. Guide technique. SETRA-LCPC (1979)., BCEOM