

Étude De L'influence Des Poudres Fines De Dolomies Sur Des Sols Limoneux Mal Gradués Utilisés En Remblais Routiers

Rakotomalala Miarintsoa Fetraniana¹, Rakotomalala Zolimboahangy¹, Rajabali Esha², Ranaivoniarivo Velomanantsoa Gabriely¹, Ratsimbazafy Hery Mikaela³, Koera Rasoloniaina Antoine¹,

¹Université d'Antananarivo, École Supérieure Polytechnique Antananarivo, Mention Science et Ingénierie des Matériaux. BP 1500 Antananarivo 101 Madagascar

² École American School of Paris. 41, rue Pasteur 92210 Saint-Cloud France

³ Centre National de Recherches Industrielles et Technologiques, Département Matériaux et Génie Civil.

BP 6294 Antananarivo 101 Madagascar

Email de l'auteur correspondant : fetramiary@gmail.com;



Résumé – La stabilisation des remblais utilisés dans la construction des routes entre dans le cadre de nos recherches, plus particulièrement, la construction des routes des hautes terres centrales de Madagascar. La construction de la route nationale n°7 qui traverse la région Vakinankaratra entre les pK.100 et pK.200 fait l'objet de notre étude. Nous avons constaté lors nos descentes d'expertises sur le long de ce tronçon, que la construction de cette route réalisée sur des sols peu profonds est la principale raison de ses déformations et ses dégradations. De plus, la présence excessive du phénomène gel-dégel dans la région met en péril la résistance du sol, ce qui accroît les risques de mouvements de terrain, d'affaissements et d'érosion. Les résultats des analyses effectuées sur des échantillons de sol issus de deux milieux différents affirment que ces sols présentent des caractéristiques géotechniques médiocres, avec une texture limoneuse mal graduée. Il est donc essentiel de mettre en place des mesures afin de garantir la durabilité de ces infrastructures. Les échantillons ont été prélevés entre 0,60 et 0,65m de profondeur et sont respectivement situés sur Ampitatafika, au pK.105 et Manandona, au pK 190. Les dolomies, utilisées comme matériaux stabilisants minéraux, qui ne contiennent d'aucunes impuretés comme des résidus organiques ou des boues, sont employées sous diverses formes. Nous avons travaillé avec 4 références de dolomies sous forme de poudres fines. Des études de formulation ont été réalisées au laboratoire en faisant varier le rapport poudre/sol, avec des taux de 4 %, 8 %, 12 % et 16 %. D'après les résultats, il est démontré que l'incorporation des dolomies dans les échantillons de sol a amélioré notablement la portance CBR. La formulation avec 8 % de poudre fine de dolomie blanche (référence n° 4) a fait augmenter la portance CBR de 50 % à 0 heure et de 80 % à 96 heures par rapport à la valeur du CBR du sol à l'état naturel. La résistance à la compression enregistrée avec cette formulation est de 3,97 MPa. L'absence du phénomène du gonflement relatif du sol a également été notée, ce qui améliore les performances des routes dans diverses conditions météorologiques. Les caractéristiques des sols sont fortement influencées par la stabilisation par les poudres de dolomie : le sol enrichi en poudre de dolomie blanche (référence n°4) présente une portance plus élevée et une bonne résistance. Toutefois, les sols stabilisés avec les dolomies des références 1, 2 et 3 présentent une résistance légèrement moindre, mais une stabilité accrue en présence d'humidité.

Mots clés – Sol limoneux mal gradué, Dolomies, Stabilisation, Remblais, Route Nationale, Dégradation

Abstract – The stabilization of embankments used in road construction falls within the scope of our research, more specifically, the construction of roads in the central highlands of Madagascar. The construction of national road n°7, which crosses the Vakinankaratra region between pK.100 and pK.200, is the subject of our study. During our survey visits along this stretch of road, we noted that its construction on shallow soils is the main cause of its deformation and degradation. In addition, the excessive freeze-thaw phenomenon in the region jeopardizes the strength of the soil, increasing the risk of ground movement, subsidence and erosion. The results of analyses carried out on soil samples from two different environments confirm that these soils have mediocre geotechnical characteristics, with a poorly graded silty texture. It is therefore essential to implement measures to guarantee the durability of these infrastructures. The samples were taken at depths of between 0.60 and 0.65 m, and are located respectively on Ampitatafika, at

pK.105, and Manandona, at pK 190. Dolomites, used as mineral stabilizing materials that contain no impurities such as organic residues or sludge, are employed in various forms. We worked with 4 dolomite references in the form of fine powders. Formulation studies were carried out in the laboratory, varying the powder/soil ratio to 4%, 8%, 12% and 16%. The results showed that incorporating dolomites into soil samples significantly improved CBR bearing capacity. The formulation with 8% fine white dolomite powder (reference no. 4) increased CBR bearing capacity by 50% at 0 hours and 80% at 96 hours, compared with the CBR value of the soil in its natural state. The compressive strength recorded with this formulation is 3.97 MPa. The absence of the phenomenon of relative soil swelling was also noted, improving road performance in various weather conditions. Soil characteristics are strongly influenced by stabilization with dolomite powders: soil enriched with white dolomite powder (reference no. 4) has higher bearing capacity and good strength. However, soils stabilized with the dolomite powders of references 1, 2 and 3 are slightly less resistant, but more stable in the presence of moisture.

Keywords – *Poorly graded silty soil, Dolomites, Stabilization, Embankments, National road, Degradation.*

I. INTRODUCTION

Les routes sont d'importantes artères de transport à l'intérieur d'un pays, offrant un moyen simple et pratique de relier des agglomérations des unes aux autres. Ils jouent un rôle central dans le développement économique en facilitant les transactions et les échanges commerciaux tout en stimulant l'amélioration des infrastructures. Une interconnexion efficace entre les différentes zones économiques est cruciale pour promouvoir la vitalité commerciale, apportant ainsi des avantages tangibles à tous les niveaux : régional, de district et provincial. Dans ce contexte, l'entretien et la réhabilitation des réseaux routiers, notamment dans les hautes terres centrales de Madagascar, sont essentiels pour simplifier les transports. Une bonne gestion de ces infrastructures peut faciliter la circulation des marchandises, améliorer l'accès aux marchés et stimuler les économies locales. C'est pour cette raison qu'il est crucial d'utiliser des matériaux différents pour les travaux d'entretien des routes. Parmi elles, la dolomie est particulièrement abondante dans la région Vakinankaratra devient une solution prometteuse de par ses propriétés mécaniques et sa disponibilité. L'objectif de cette étude est d'explorer comment l'incorporation de ces poudres blanches de dolomie dans la construction de remblais pourrait non seulement améliorer les performances routières mais également contribuer à une approche plus respectueuse de l'environnement qui valorise les ressources locales tout en limitant l'empreinte écologique des matériaux de construction traditionnels. En analysant les impacts techniques, environnementaux et socio-économiques de cette utilisation, nous espérons ouvrir de nouvelles perspectives sur les pratiques de construction durable dans une région où la biodiversité est à la fois riche et menacée, tout en utilisant des déchets de calcium et de magnésium riches en CO₂. Nous visons à valoriser des ressources riches en CaCO₃ et en MgCO₃, notamment des dolomies. Ces matériaux, après un traitement thermique, permettent d'obtenir une source de chaux, composée de 50 % de CaCO₃ et de 40 % de MgCO₃, pouvant servir à stabiliser les sols utilisés dans la construction des remblais routiers qui ont une texture limoneuse mal graduée. C'est dans cette perspective que nous avons intitulé notre étude : « **Étude de l'influence des poudres fines de dolomie sur les sols limoneux mal gradués utilisés en remblais routiers** ».

II. MATERIELS ET METHODES

II.1 Provenance et présentation des matériaux

II.1.1 Échantillons de sols

Des échantillons de sol ont été prélevés à deux endroits différents à proximité de la RN7 (Ampitatafika, Manandona). Ces zones sont caractérisées par des tronçons routiers en très mauvais état et de fortes déformations.

Tableau 1 : site de prélèvement des échantillons de sol

Désignation	Site de prélèvement	Coordonnées GPS
Sol 1	Ampitatafika	S.19°33'59.9'' et E.47°20'59.9''
Sol 2	Manandona	S.20°02'60.0'' et E.47°03'60.0''

La profondeur d'échantillonnage était d'un mètre pour exclure la matière organique. Après collecte, les sols sont placés dans des sacs scellés pour préserver sa teneur naturelle en humidité puis transportés vers différents laboratoires pour analyses. Ces analyses ont été réalisées aux Laboratoire BTP et Laboratoire des Matériaux de l'École Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, LNTPB et CNRIT (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 Dolomies

Les dolomies que nous avons utilisées proviennent de la région Vakinankaratra.



Photo 2 : 4 références d'échantillons de poudre de dolomie (Source : Auteur)

II.2 Préparation des matériaux d'expérimentation

II.2.1 Préparation des échantillons de sol

- Séchage : Éliminer toutes impuretés dans les échantillons, telles que les grosses particules supérieures à 2 cm et les débris végétaux, puis sécher à l'air libre, à l'abri de l'humidité.
- Broyage : Il est ensuite broyé manuellement à l'aide de tamis conformes aux normes AFNOR jusqu'à ce que la granulométrie soit inférieure à 400 µm (0,4 mm).

II.2.2 Préparation des poudres blanches de dolomie

- Broyage : chaque échantillon de dolomie est broyé à l'aide d'un broyeur à broyeur à broyeur du CNRIT jusqu'à obtention de la poudre fine (environ 1h et 30mn).
- Tamisage : la poudre obtenue est tamisée à 50µm pour obtenir de la poudre très fine.

- Analyse : les poudres de dolomies sont analysées pour vérifier leurs compositions chimiques et leurs propriétés. Les teneurs en carbonate de calcium (CaCO_3) sont environs de 45% et celle du carbonate de magnésium (MgCO_3) environs de 35%.

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

Les sols et les quatre (4) références de poudres de dolomie sont mélangés avec de l'eau à raison de 1,5 fois la limite de liquidité du sol naturel selon la bibliographie, puis malaxés avec un agitateur électrique pendant 15 minutes. La pâte homogène résultant de cette opération est placée dans les éprouvettes d'élancement 1 (6cm*6cm) et séchée à l'air libre, les galettes obtenues sont destinées aux différents essais :

Tableau 2 : Formulation avec de la poudre fine de dolomie blanche (S1 + D)

Formulation	Quantité en masse à introduire dans le malaxeur.
Témoin	100% Sol (S1)
F1	S1 96% + D 4%
F2	S1 92% + D 8%
F3	S1 88% + D 12%
F4	S1 84% + D 16%

Tableau 3 : Formulation avec de la poudre fine de dolomie blanche (S2 + D)

Formulation	Quantité en masse à introduire dans le malaxeur.
Témoin	100% Sol (S2)
F1'	S2 96% + D 4%
F2'	S2 92% + D 8%
F3'	S2 88% + D 12%
F4'	S2 84% + D 16%

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.

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

II.3.2 Poids spécifiques

C'est le rapport entre le poids et le volume exprimé en T/m³.

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

II.3.3 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 (%)

$$\text{Refus cumulé (\%)} = \frac{\text{Refus cumulé en g}}{M_s} \times 100 \quad \text{et} \quad \text{Tamisât cumulé (\%)} = 100 - R_f \text{ en \%}$$

II.3.4 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: ω_P
- La limite de liquidité : ω_L
- Et l'indice de plasticité : $I_p = \omega_L - \omega_P$

II.3.5 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.

II.3.6 Essais de compactage

- a- 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.
- b- 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.3.7 Les essais mécaniques - 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.

III. RESULTATS ET DISCUSSIONS

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

III.1.1 Textures des sols

Nous présentons dans le tableau suivant la texture des sols à partir du niveau zéro à 1,10m de profondeur

Tableau 4 : Nature des sols

Profondeur (m)	Sol 1 – Site 1	Sol 2 – Site 2
0,00 - 0,65	Limoneux mal gradué	Limoneux mal gradué
0,65 - 0,85	Légèrement argileuse marron grisâtre	Légèrement sableuse grisâtre
0,85 - 1,10	Sableuse argileuse grisâtre	Sableuse grisâtre

III.1.2 Paramètres pressiométriques

Les essais pressiométriques ont été réalisés dans un milieu imperméable, situé sous la nappe phréatique et non drainé, et ont fourni les résultats indiqués dans le tableau ci-dessous :

Tableau 5 : Paramètres pressiométriques

		Site 1		Site 2	
Profondeur (m)		E (MPa)	PI (MPa)	E (MPa)	PI (MPa)
0,00 - 0,65	Essai 1	1,78	0,18	3,67	0,37
	Essai 2	1,60	0,07	4,93	0,32
0,65 - 0,85	Essai 3	2,42	0,14	10,09	0,65
	Essai 4	6,97	0,51	11	0,68
0,85 - 1,10	Essai 5	14,73	0,19	17,11	1,66
	Essai 6	15,20	1,55	17,79	1,78

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

Les paramètres pressiométriques diffèrent selon les sites et les profondeurs. Dans les deux sites, les valeurs maximales ont été observées à une profondeur de 1 mètre : 1,55 MPa pour le Site 1 et 1,78 MPa pour le Site 2.

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 :

Tableau 6 : Analyse granulométrique des sols

Désignation	Ouverture des tamis (mm)/Passant cumulé (%)						
	41	38	34	32	29	26	20
Tamisât cumulé (%) de S1	-	100	98	94	81	77	72
Tamisât cumulé (%) de S2	-	100	94	83	66	61	54

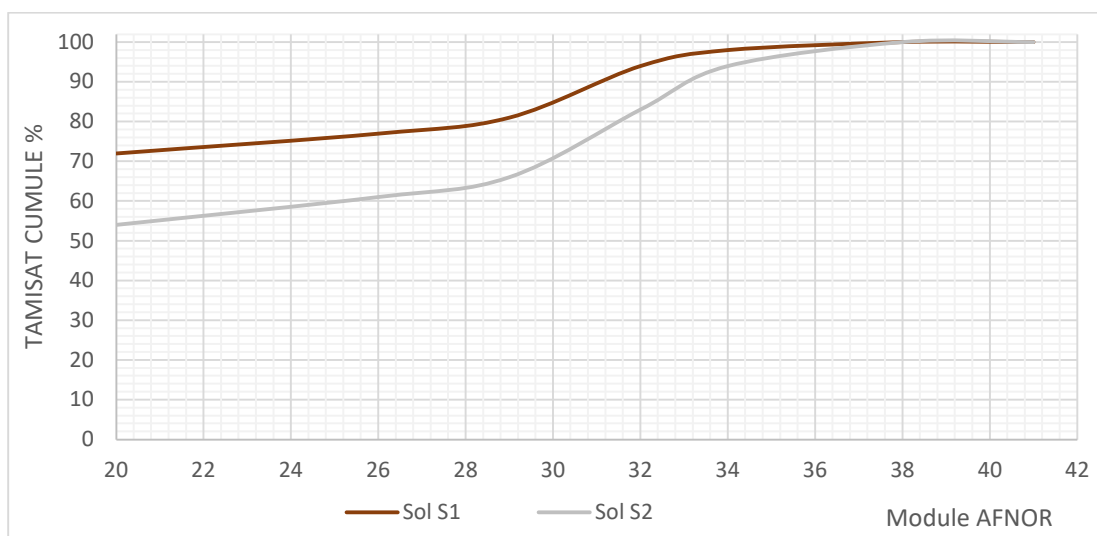


Figure 1 : courbes granulométriques des échantillons de sols S1 et S2

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	ω_L (%)	ω_P (%)	I_P (%)
Sol S1	68,3	40,2	28
Sol S2	43,4	25,9	18

III.2.3 Les caractéristiques physiques

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

Tableau 8 : Caractéristiques physiques

Désignation	Texture	ω (%)	Poids volumique sec (KN/m ³)
Sol S1	Limoneux Légèrement argileuse marron grisâtre	19,9	27,10
Sol S2	Limoneux Légèrement sableuse grisâtre	17,9	27,30

III.2.4 Essais de compactage PROCTOR et Essai de portance CBR

Les résultats des essais de compactages des deux sols sont présentés ci-dessous :

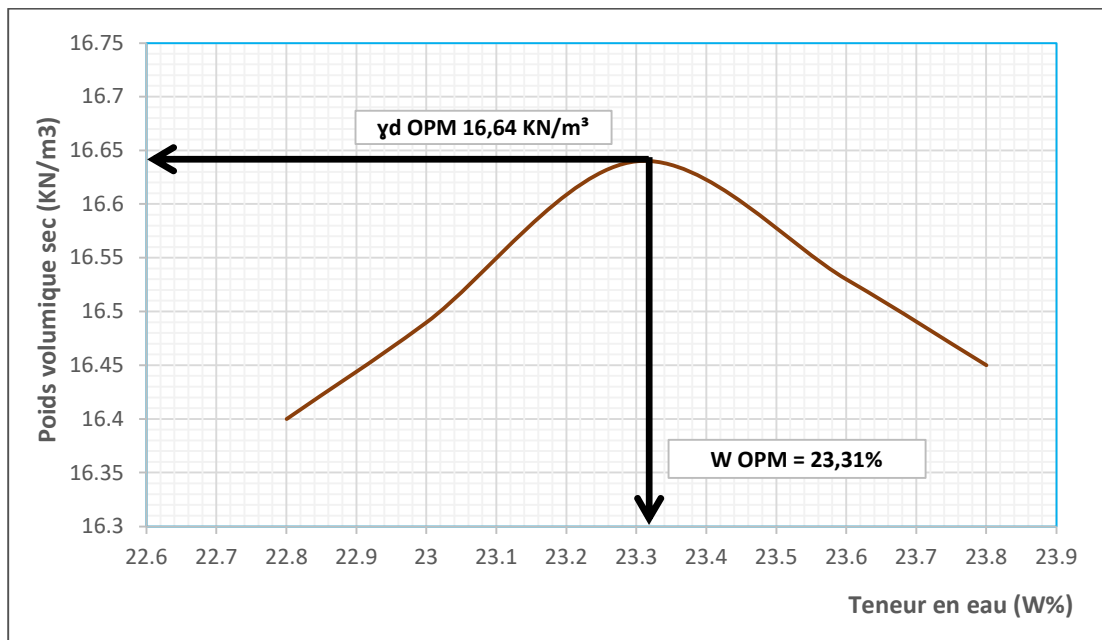


Figure 2 : Courbe de Proctor de compactage du Sol S1

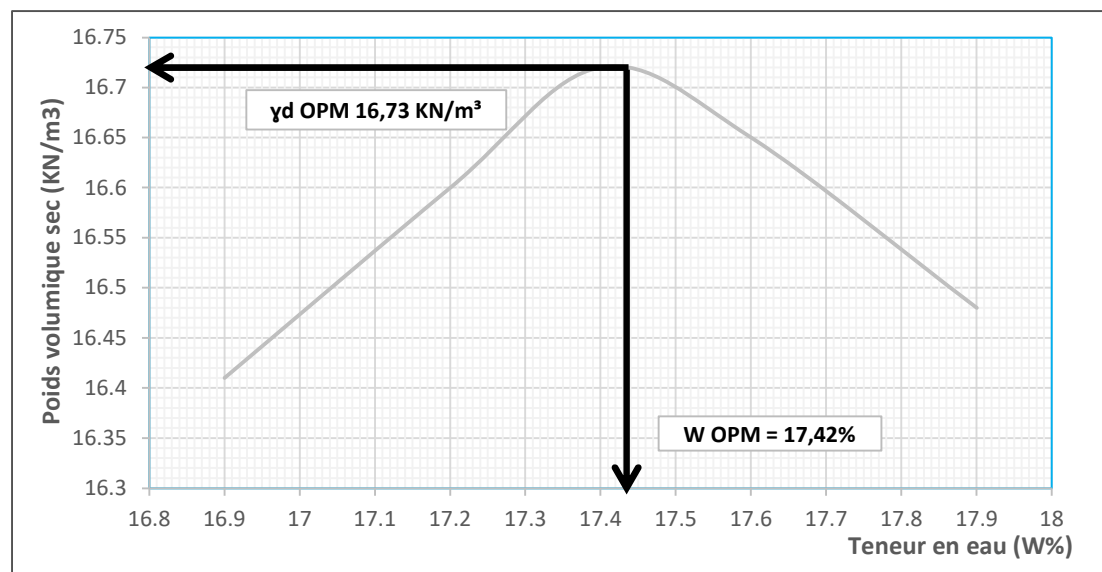


Figure 3 : Courbe de Proctor de compactage du Sol S2

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

Tableau 9 : Proctor et portance ICBR

Désignation	Essai PROCTOR		Essai CBR à 95% OPM
	γ_d opt (KN/m ³)	ω opt (%)	Indice CBR (4j immersion)
Sol S1	16,64	23,31	15
Sol S2	16,73	17,42	20

III.2.5 Classification des sols

Selon les caractéristiques des sols, on peut déduire leur classification GTR (*Guide des Terrassements routiers*)

Tableau 10 : Classification des échantillons de sol [GTR 2024 : NORME NF EN 16907]

Désignation	Nature des sols selon Ip	Classification GTR
Sol S1	Sol très plastique	F3
Sol S2	Sol plastique	F2

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 D1

Désignation	Formulation	γ_d (KN/m ³) avec D1	γ_d (KN/m ³) avec D2	γ_d (KN/m ³) avec D3	γ_d (KN/m ³) avec D4
Sol S1	Témoin	27,10	27,10	27,10	27,10
	F1	27,51	27,46	27,28	28,05
	F2	27,86	27,83	27,48	28,61
	F3	27,72	27,66	27,37	28,32
	F4	27,47	27,36	27,26	28,01
Sol S2	Témoin	27,30	27,30	27,30	27,30
	F1'	27,67	27,56	27,35	28,22
	F2'	27,99	27,95	27,59	28,76
	F3'	27,82	27,76	27,46	28,59
	F4'	27,59	27,44	27,32	28,30

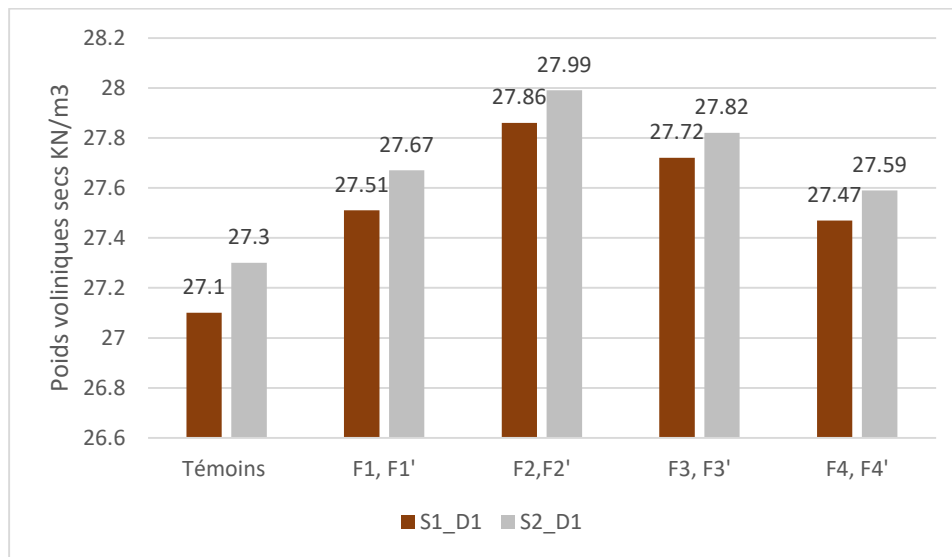


Figure 4 : Variation des poids volumiques des sols stabilisés à la poudre D1

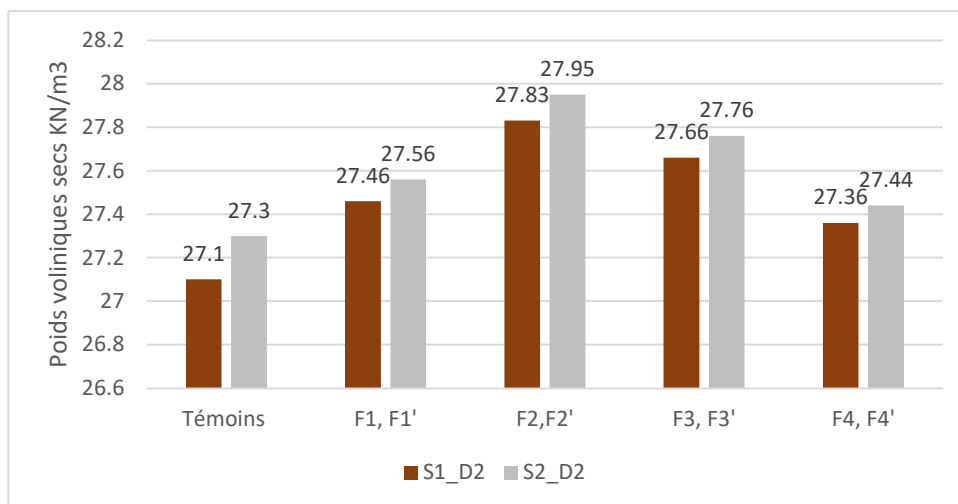


Figure 5 : Variation des poids volumiques des sols stabilisés à la poudre D2

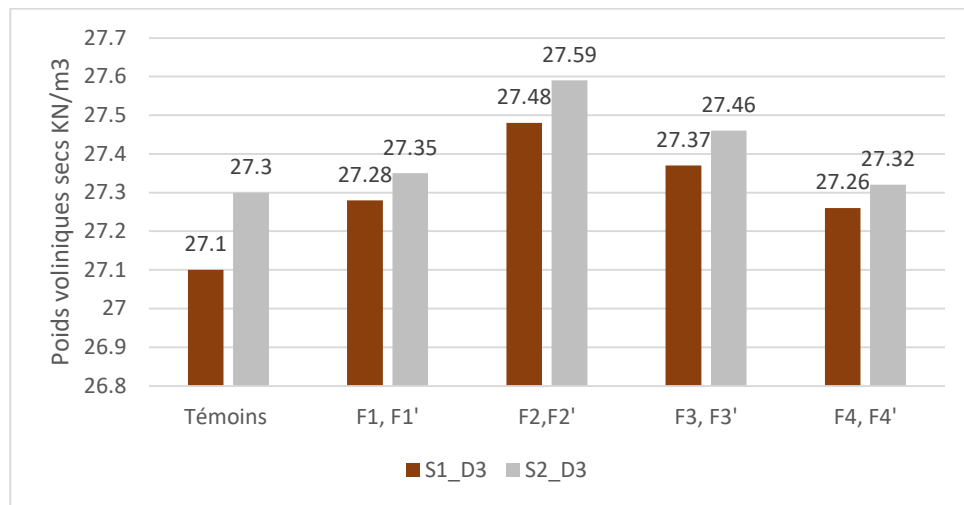


Figure 6 : Variation des poids volumiques des sols stabilisés à la poudre D3

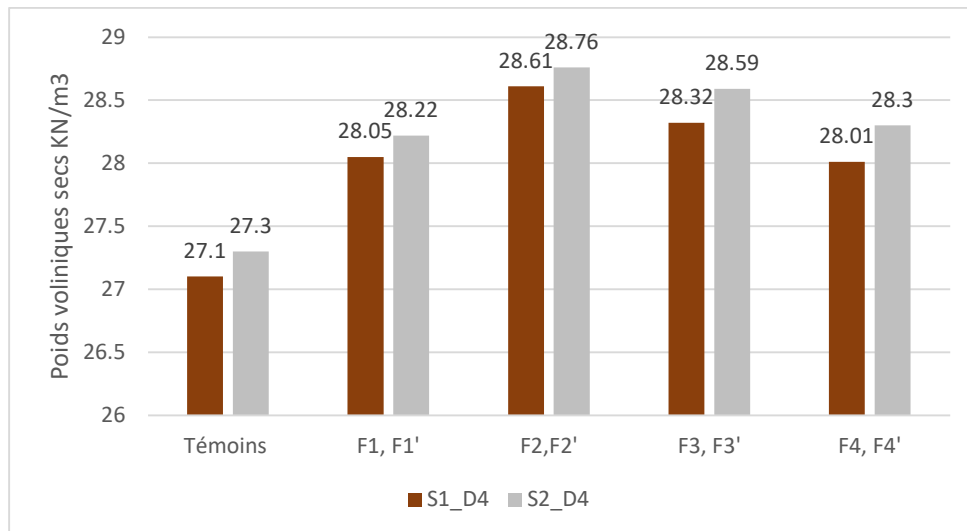


Figure 7 : Variation des poids volumiques des sols stabilisés à la poudre D4

III.3.2 Résultats des essais de compactage

III.3.2.1 Comportement des éprouvettes avec de la poudre D1

Tableau 12 : Essai Proctor, Indice de portante des SOL + D1

Désignation	Formulation	Essai PROCTOR		Essai CBR à 95% OPM
		γ_d Opt (KN/m ³)	ω Opt (%)	Indice CBR (4j immersion)
Sol S1	Témoin	16,64	23,3	15
	F1	17,15	18,5	30
	F2	17,32	17,98	48
	F3	17,61	17,65	36
	F4	17,94	17,47	33
Sol S2	Témoin	16,72	17,4	20
	F1'	17,24	16,9	41
	F2'	17,43	16,5	52
	F3'	17,71	16,21	42
	F4'	18	16	42

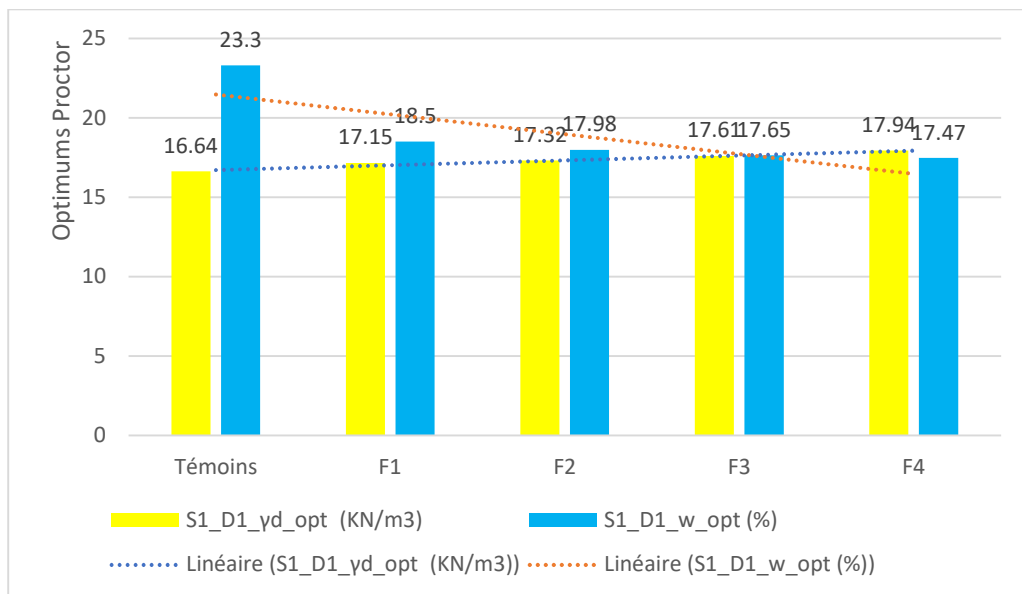


Figure 8 : Variation des optimums Proctor des éprouvettes de S1 avec de la poudre D1

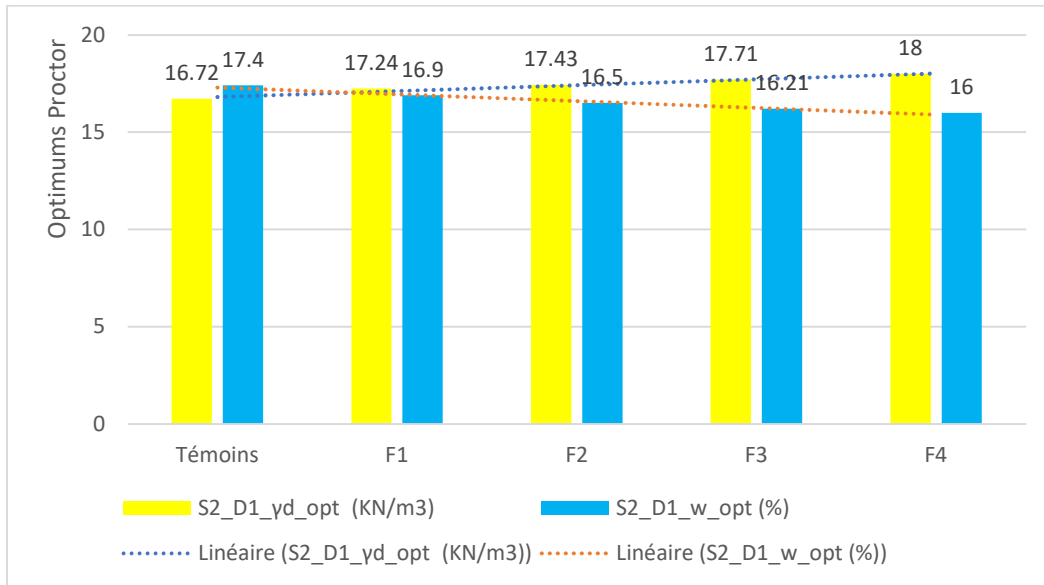


Figure 9 : Variation des optimums Proctor des éprouvettes de S2 avec de la poudre D1

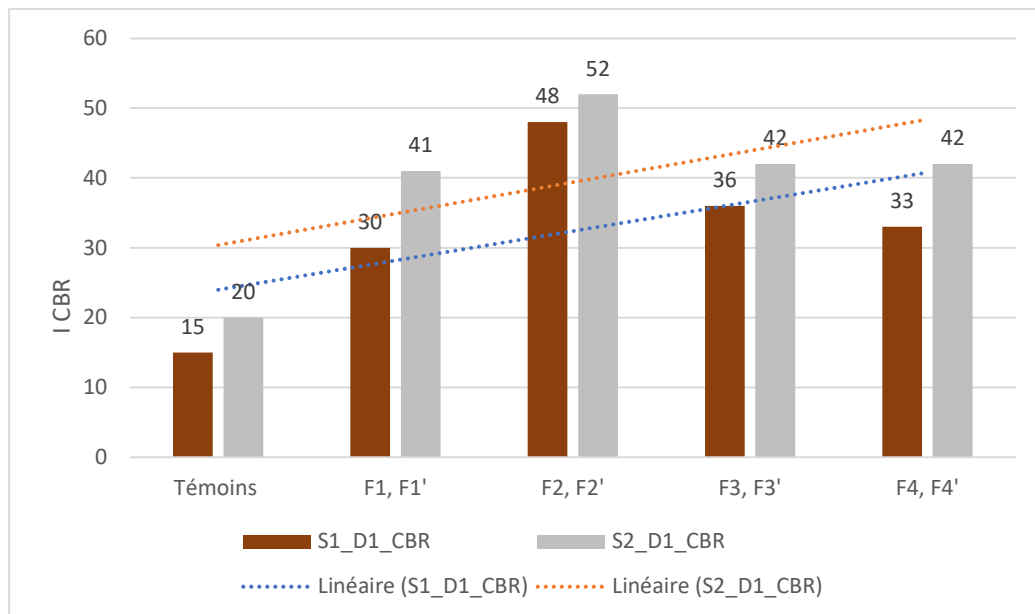


Figure 10 : Évolution des ICBR des sols stabilisés avec le % de D1

III.3.2.2 Comportement des éprouvettes avec de la poudre D2

Tableau 13 : Essai Proctor, Indice de portance des SOL + D2

Désignation	Formulation	Essai PROCTOR		Essai CBR à 95% OPM
		γ_d Opt (KN/m ³)	ω Opt (%)	Indice CBR (4j immersion)
S1	Témoin	16,64	23,3	15
	F1	17,13	18,7	29
	F2	17,3	18	47
	F3	17,59	17,66	35
	F4	17,92	17,49	32
S2	Témoin	16,72	17,4	20
	F1'	17,22	17,1	40
	F2'	17,41	16,62	51
	F3'	17,69	16,44	41
	F4'	17,98	16,12	40

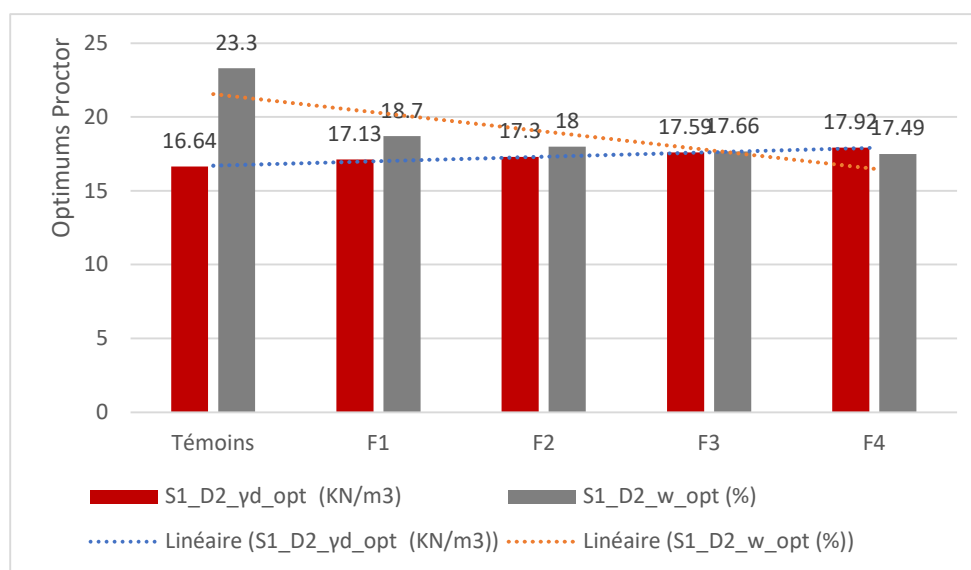


Figure 11 : Variation des optimums Proctor des éprouvettes de S1 avec de la poudre D2

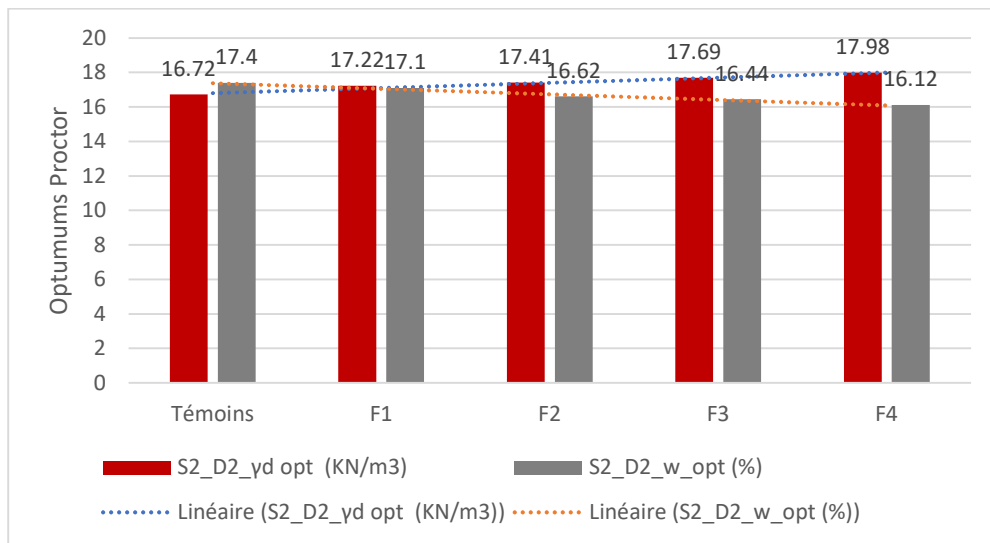


Figure 12 : Variation des optimums Proctor des éprouvettes de S2 avec de la poudre D2

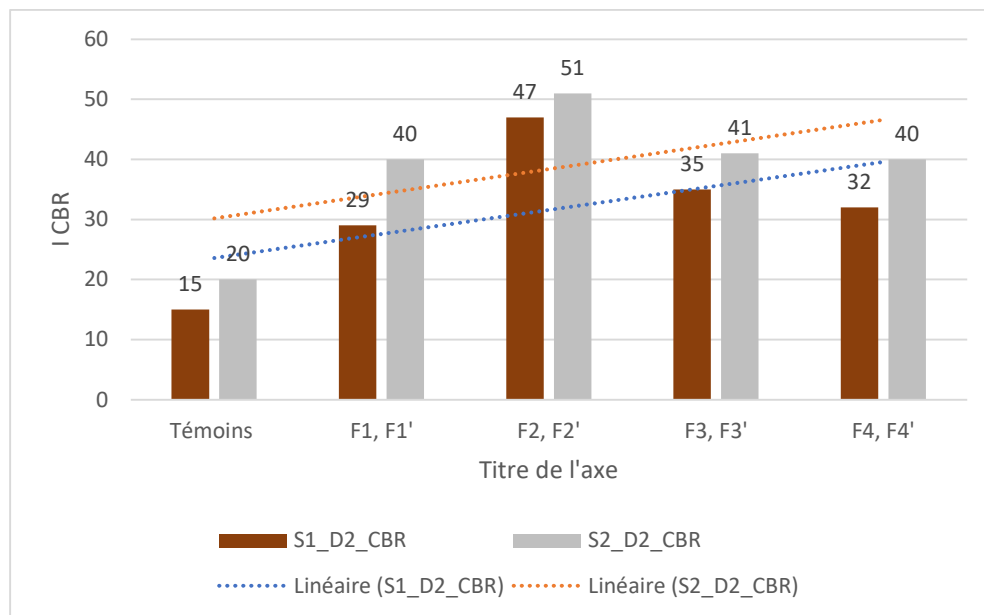


Figure 13 : Évolution des ICBR des sols stabilisés avec le % de D2

III.3.2.3 Comportement des éprouvettes avec de la poudre D3

Tableau 14 : Essai Proctor, Indice de portance des SOL + D3

Désignation	Formulation	Essai PROCTOR		Essai CBR à 95% OPM
		γ_d Opt (KN/m ³)	ω Opt (%)	Indice CBR (4j immersion)
S1	Témoin	16,64	23,3	15
	F1	17,06	19,8	18
	F2	17,2	19,6	36
	F3	17,32	19,3	28
	F4	17,51	19,01	21
S2	Témoin	16,72	17,4	20
	F1'	16,8	17,1	34
	F2'	16,98	17,01	44
	F3'	17,03	16,88	36
	F4'	17,2	16,4	34

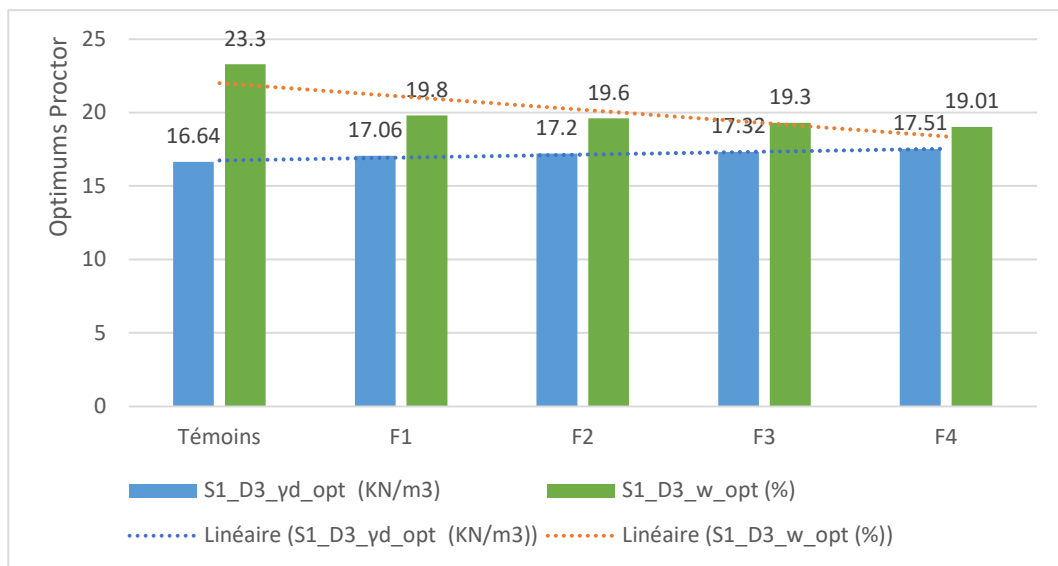


Figure 14 : Variation des optimums Proctor des éprouvettes de S1 avec de la poudre D3

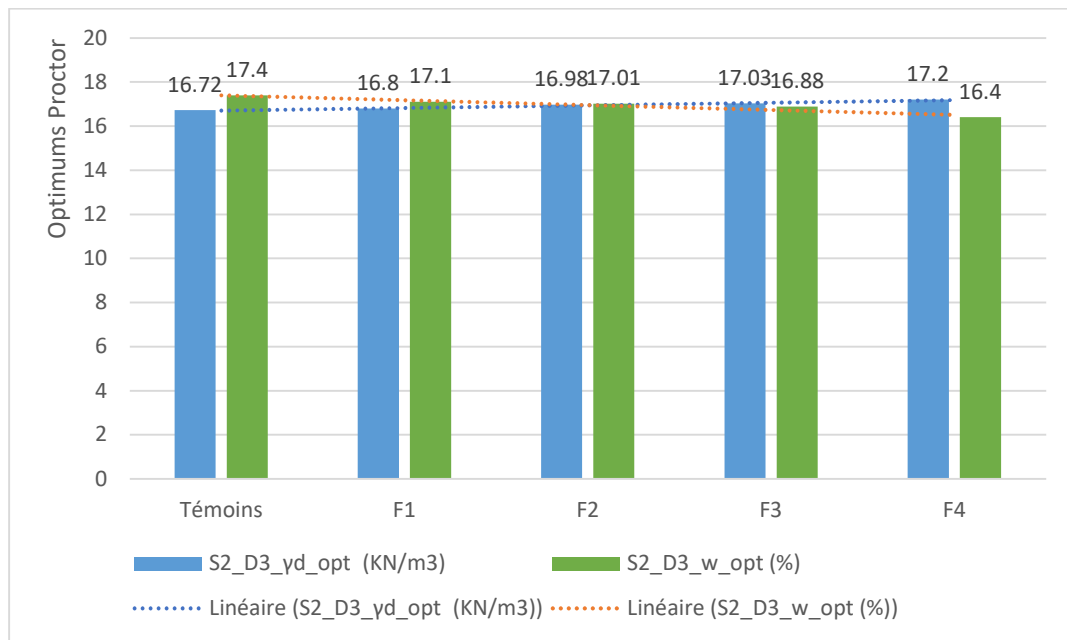


Figure 15 : Variation des optimums Proctor des éprouvettes de S2 avec de la poudre D3

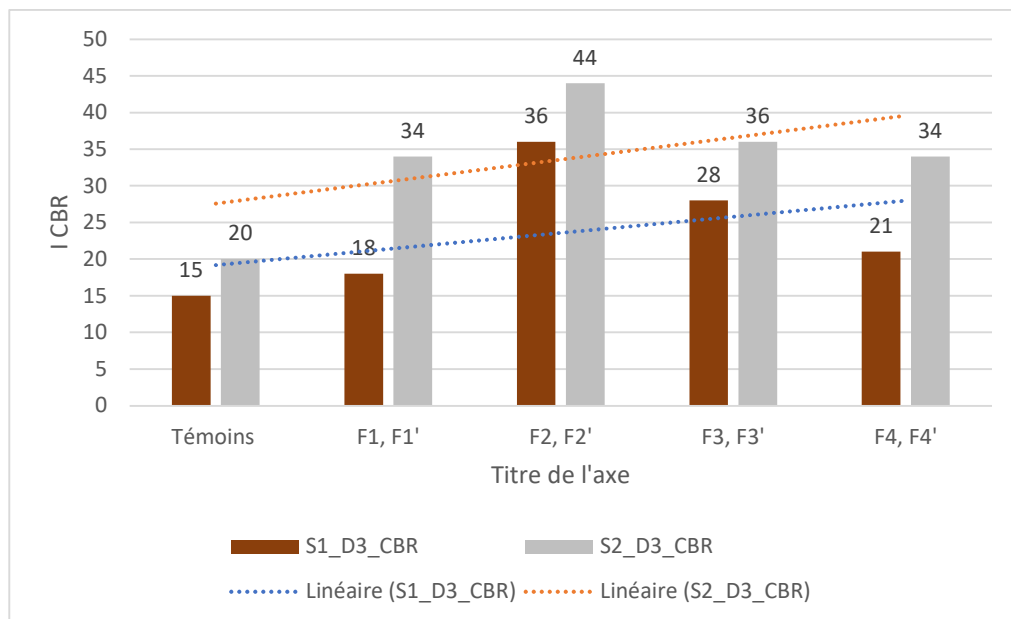


Figure 16 : Évolution des ICBR des sols stabilisés avec le % de D3

III.3.2.4 Comportement des éprouvettes avec de la poudre D4

Tableau 15 : Essai Proctor, Indice de portance des SOL + D4

Désignation	Formulation	Essai PROCTOR		Essai CBR à 95% OPM
		γ_d Opt (KN/m ³)	ω Opt (%)	Indice CBR (4j immersion)
S1	Témoin	16,64	23,3	15
	F1	17,2	18	32
	F2	17,37	17,93	50
	F3	17,66	17,6	38
	F4	18,01	17,41	35
S2	Témoin	16,72	17,4	20
	F1'	17,29	16,85	43
	F2'	17,48	16,45	55
	F3'	17,76	16,15	44
	F4'	18,05	15,95	43

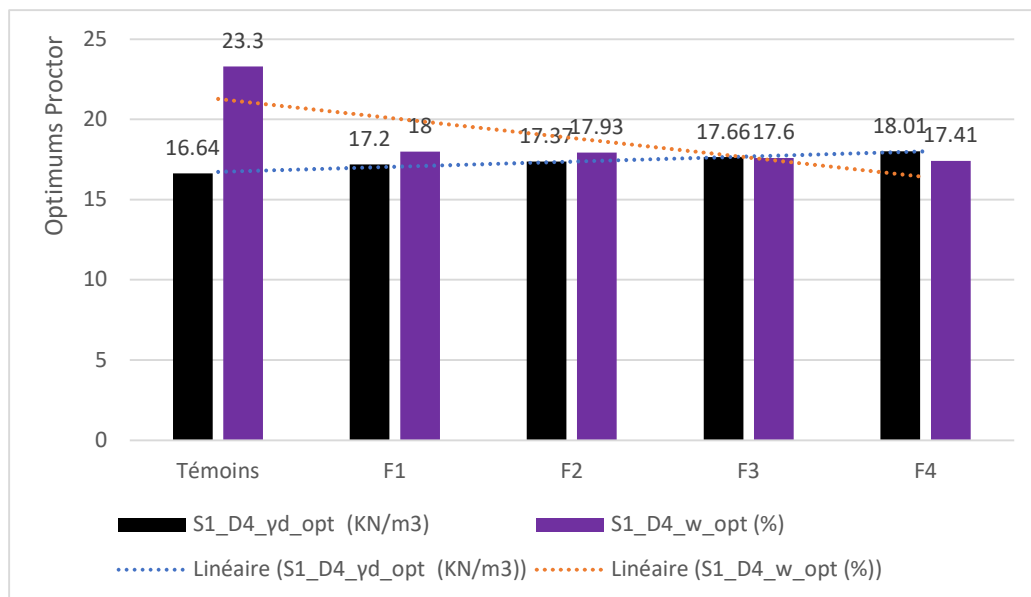


Figure 17 : Variation des optimums Proctor des éprouvettes de S1 avec de la poudre D4

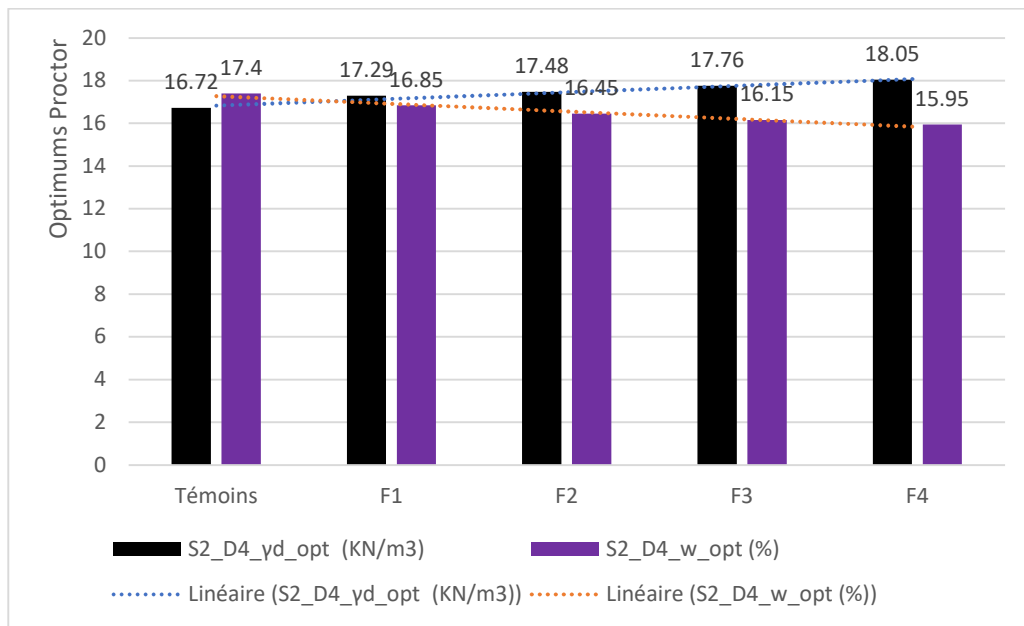


Figure 18 : Variation des optimums Proctor des éprouvettes de S2 avec de la poudre D4

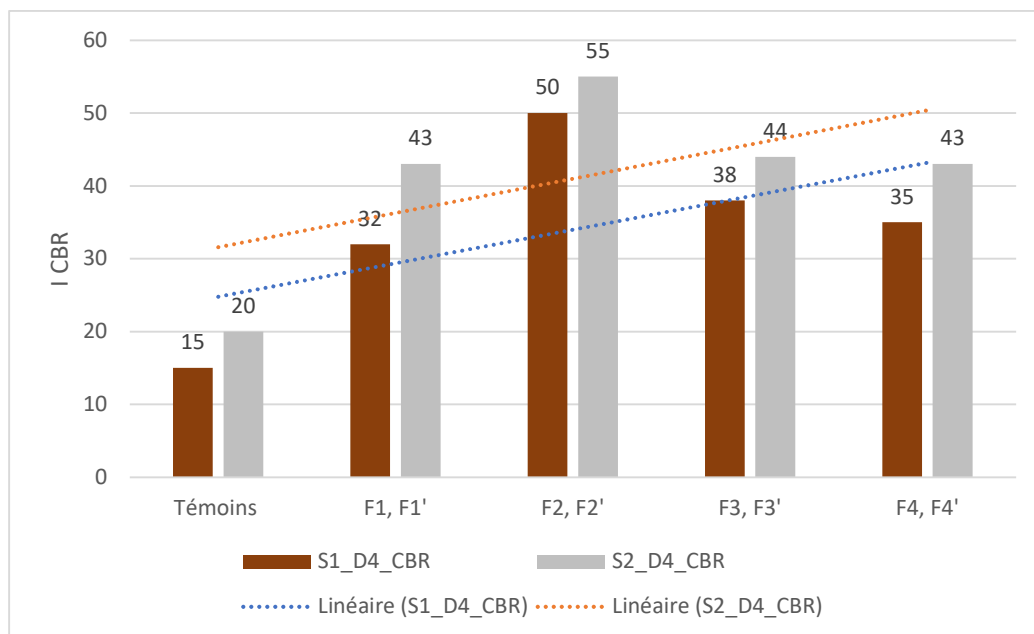


Figure 19 : Évolution des ICBR des sols stabilisés avec le % de D4

III.3.3 Valeurs de la compacité

C'est le rapport entre Densité sèche (γ_d CBR) et la Densité optimale Proctor ($\gamma_{d_{opt}}$ Proctor).

Tableau 16 : Valeurs de la compacité

Désignation	Formulation	Compacité % + D1	Compacité % + D2	Compacité % + D3	Compacité % + D4	Spécification
Sol S1	Témoin	94,15	94,15	94,15	94,15	>95
	F1	96,48	96,41	95,90	97,18	
	F2	96,96	96,91	95,98	97,59	
	F3	96,16	96,14	95,90	97,09	
	F4	96,09	96,09	95,89	97,03	
Sol S2	Témoin	94,81	94,81	94,81	94,81	
	F1'	96,71	96,63	96,56	97,66	
	F2'	97,93	97,87	97	99,27	
	F3'	97,17	97,10	96,71	98,63	
	F4'	96,90	96,73	96	98	

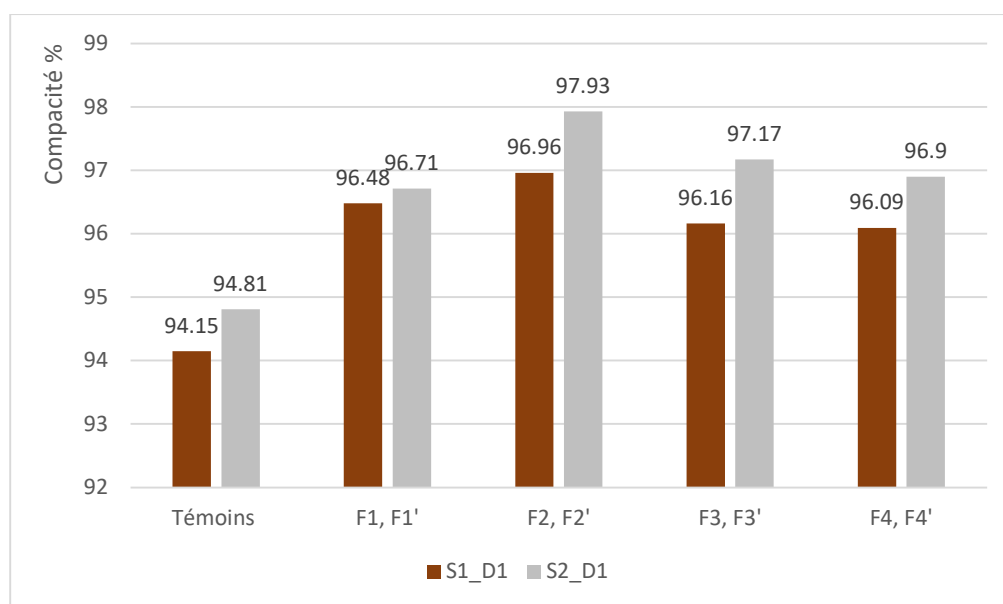


Figure 20 : Variation de la compacité des sols stabilisés avec de la poudre D1

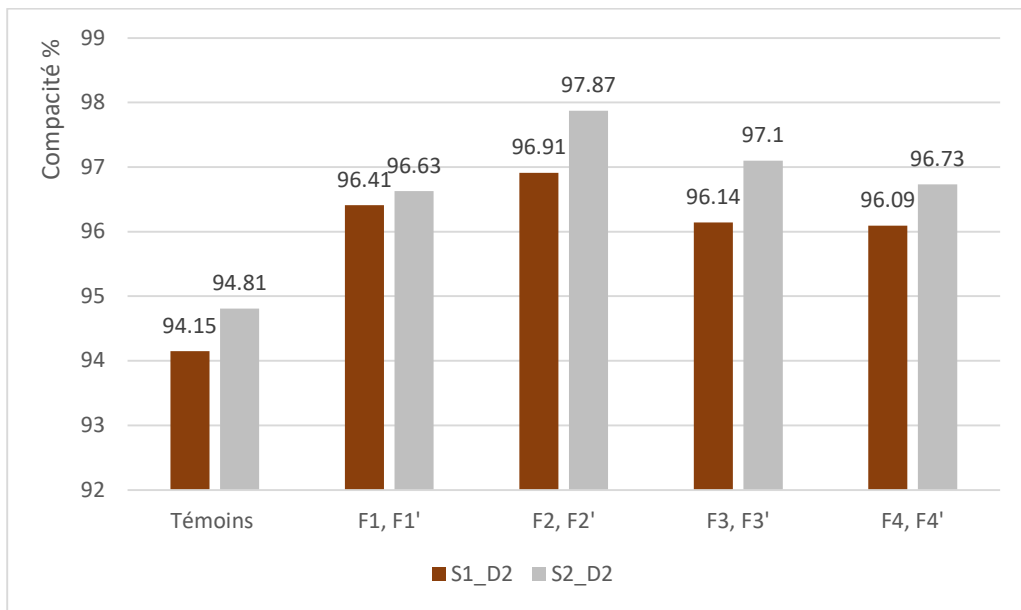


Figure 21 : Variation de la compacité des sols stabilisés avec de la poudre D2

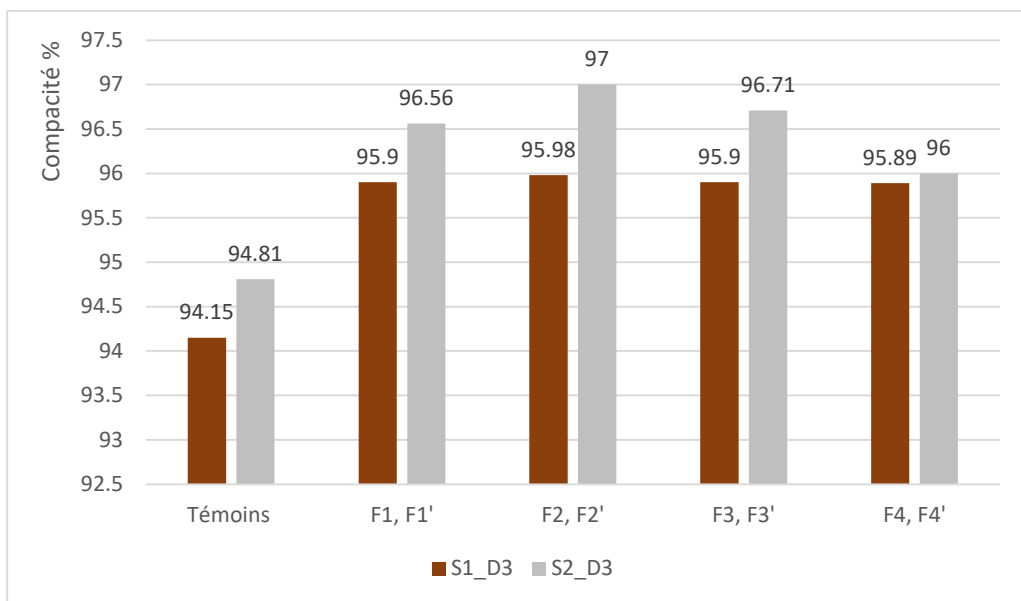


Figure 22 : Variation de la compacité des sols stabilisés avec de la poudre D3

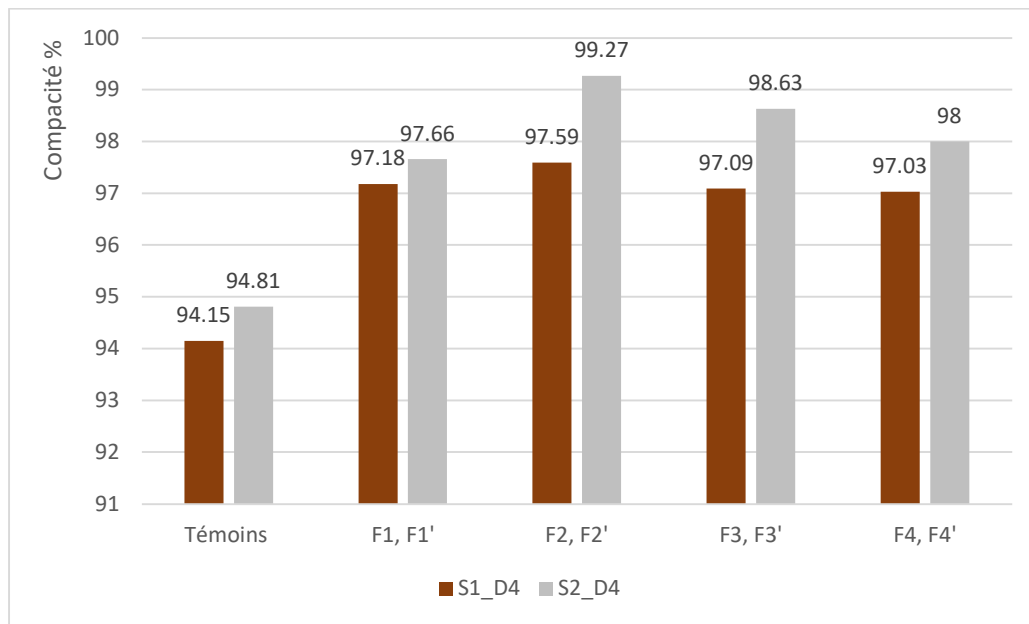


Figure 23 : Variation de la compacité des sols stabilisés avec de la poudre D4

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 17 : Valeurs de la Résistance à la compressions (Rc)

Désignation	Formulation	Rc en MPa + D1	Rc en MPa + D2	Rc en MPa + D3	Rc en MPa + D4
Sol S1	Témoin	1,25	1,25	1,25	1,25
	F1	1,81	1,61	1,34	2,03
	F2	3,50	3,17	2,88	3,76
	F3	2,87	2,69	1,96	2,90
	F4	2,19	2,01	1,79	2,48
Sol S2	Témoin	1,45	1,45	1,45	1,45
	F1'	1,92	1,72	1,54	2,24
	F2'	3,60	3,41	3,02	3,97
	F3'	2,90	2,72	2,23	3,03
	F4'	2,33	2,10	1,98	2,75

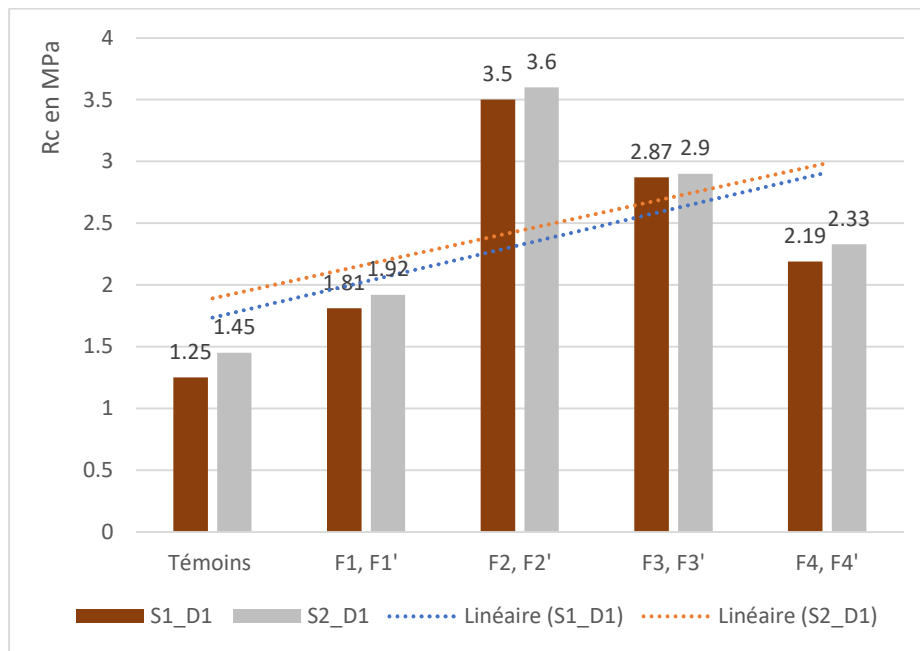


Figure 24 : Variation de la Rc des sols stabilisés avec de la poudre D1

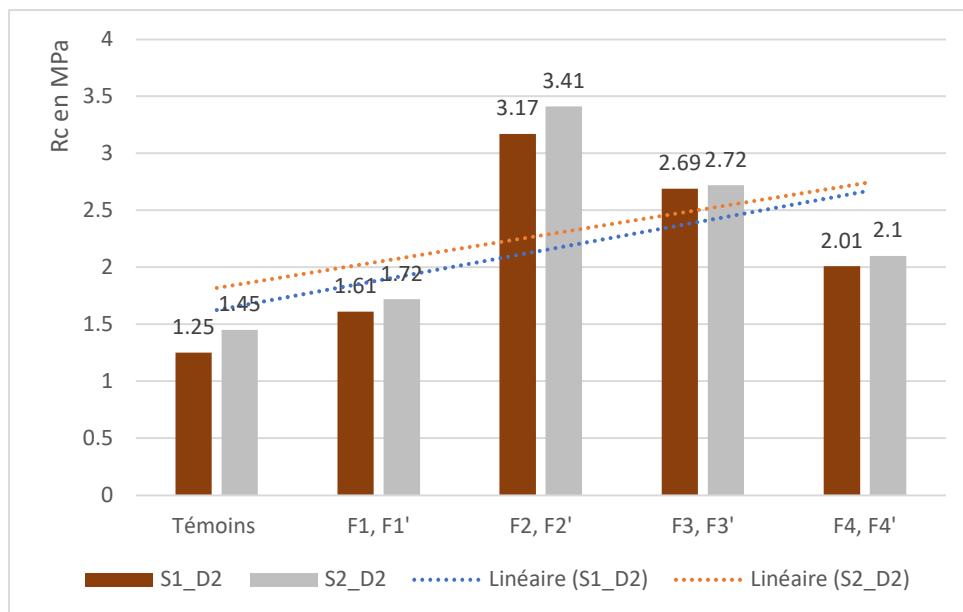


Figure 25 : Variation de la Rc des sols stabilisés avec de la poudre D2

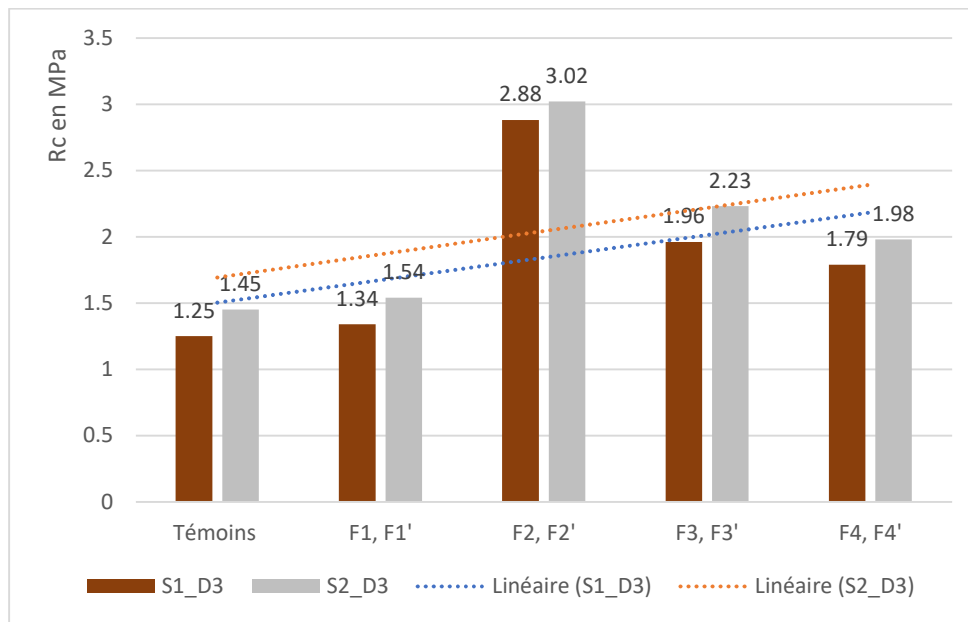


Figure 26 : Variation de la Rc des sols stabilisés avec de la poudre D3

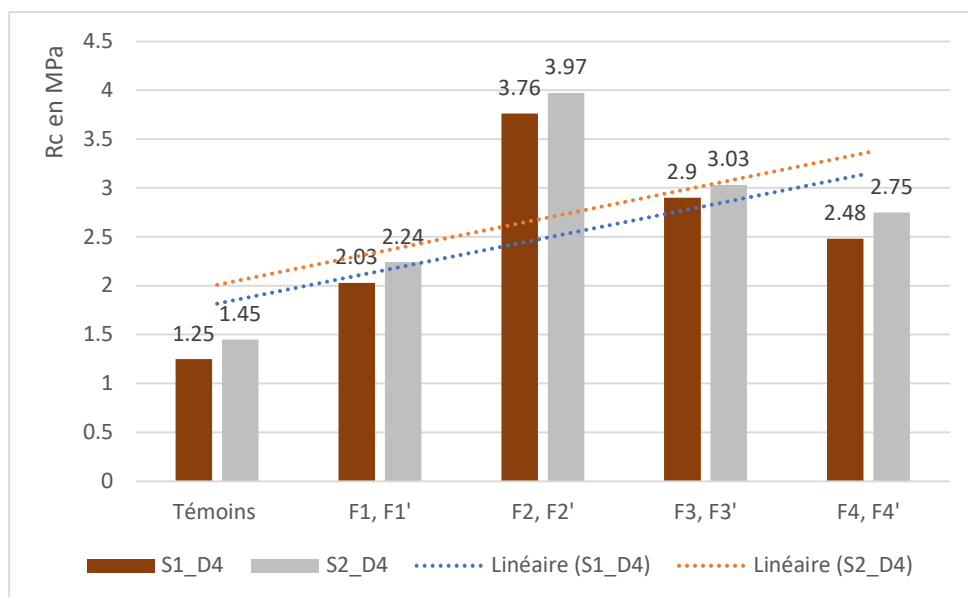


Figure 27 : Variation de la Rc des sols stabilisés avec de la poudre D4

III.4 Discussions

III.4.1 Caractéristiques des matériaux d'expérimentation

- **Texture du sol (sable et argile) sont :** Les sols étudiés présentent une texture limoneuse mal graduée, la distribution des tailles des particules est déséquilibrée, ce qui signifie que certaines tailles peuvent être sur-représentées tandis que d'autres sont sous-représentées. Dans les 2 sols, la proportion de limon est relativement plus élevée, tandis que les autres fractions (sable et argile sont respectivement sous-représentées).

- **Paramètre pressiométrique (Epm) :** Ici, le sol S2 montre une valeur pressiométrique élevée que celle de S1 (1,78 MPa contre 1,57 MPa pour S1), ce qui indique que le sol S2 est plus rigide et pourrait mieux supporter les charges. Cela pourrait être dû à la présence de sable dans S2, qui améliore généralement la résistance au cisaillement.

- **Plasticité :** Le sol S1, avec une plasticité de 28%, est très plastique que S2 (18%), ce qui signifie que S1 est plus susceptible de gonfler et de se contracter avec les variations d'humidité, tandis que S2, étant légèrement sableux, devrait être moins affecté par ces variations.

- **CBR après immersion :** Le CBR après immersion mesure la capacité portante d'un sol après avoir été saturé d'eau. Un CBR plus élevé indique une meilleure capacité portante et une résistance plus grande sous des conditions humides. Le CBR plus élevé de S2 (20 contre 15 pour S1) suggère que S2 est plus stable sous saturation, ce qui peut être dû à sa teneur plus faible en argile et sa fraction sableuse qui améliore le drainage. S1, avec un CBR plus bas, est plus vulnérable aux effets de l'humidité, ce qui le rend moins adapté pour des applications où une bonne portance est cruciale, surtout en conditions de saturation.

Conclusion : Le sol S1 (limoneux légèrement argileux) a un degré plasticité très marqué, une faible capacité portante sous saturation, ce qui peut poser des problèmes dans certaines applications de génie civil, notamment pour les fondations et les routes, sauf si des traitements spécifiques sont mis en œuvre pour réduire ces effets. Le Sol S2 (limoneux légèrement sableux) présente des propriétés plus stables, avec une meilleure résistance à la déformation et une meilleure capacité portante sous immersion. La présence de sable contribue à une meilleure compaction, un meilleur drainage, et une capacité portante plus élevée, le rendant plus adapté à des projets de construction nécessitant une meilleure performance sous charges et conditions humides. Le sol S2 semble être plus favorable pour des applications nécessitant une meilleure résistance mécanique et aux variations d'humidité. Le sol S1 pourrait nécessiter des traitements de stabilisation ou une attention particulière dans des conditions d'humidité élevée ou de saturation pour éviter des problèmes liés à la plasticité.

III.4.2 Caractéristiques des éprouvettes d'expérimentation

- **Influence sur les poids volumiques des éprouvettes :** Le poids volumique des différents remblaiements a été évalué, montrant divers résultats significatifs pour la stabilité des sols. Le premier ensemble de valeurs, à 27,86 kN/m³, souligne une bonne densité du remblai, essentielle pour la stabilité. Une légère augmentation à 27,99 kN/m³ reflète une meilleure intégration des particules de dolomie. Pour les mélanges contenant D2, les poids volumiques sont de 27,83 kN/m³ pour S1 et 27,95 kN/m³ pour S2, légèrement inférieurs à ceux obtenus avec D1, mais malgré tout compétitifs, suggérant une intégration réussie de D2. En revanche, les mélanges avec D3, affichant des poids volumiques de 27,48 kN/m³ pour S1 et 27,59 kN/m³ pour S2, montrent des valeurs plus basses que les précédents, indiquant un impact moindre sur la densité des mélanges. Enfin, les résultats étant particulièrement notables pour les mélanges avec D4, qui affichent des poids volumiques de 28,61 kN/m³ pour S1 et 28,76 kN/m³ pour S2, indiquent une amélioration significative de la masse volumique, renforçant ainsi la stabilité et la résistance des sols. En somme, les résultats reflètent l'importance de la sélection des dolomies dans l'optimisation de la densité des mélanges de sol.

- **Influence sur les CBR :** Le rapport sur la capacité portante des sols stabilisés présente plusieurs formulations de mélange avec des résultats mesurés par le CBR (California Bearing Ratio). Avec la poudre D1 : les valeurs de CBR enregistrées pour les 2 types de sols qui respectivement 48 et 52 indique une capacité de support adéquate pour des charges modérées à lourdes, convenant aux remblais routiers, avec un CBR recommandé supérieur à 30 pour les couches de base. Pour la poudre D2, les formulations F2 (S1) et F2' (S2) montrent un CBR de 47 et 51 respectivement. Bien qu'il y ait une légère réduction par rapport à D1, F2' confirme une meilleure performance de S2, suggérant une interaction bénéfique entre le sol et la dolomie, ce qui améliore la résistance au cisaillement. En ce qui concerne D3, les résultats indiquent une chute significative des CBR, avec 36 pour F2 et 44 pour F2'. Cela indique que cet ajout a dégradé la capacité portante, malgré une meilleure performance de S2 par rapport à S1. Avec D4, les résultats sont très encourageants : F2 atteint 50 et F2' atteint 55, montrant ainsi une bonne capacité portante, renforçant l'observation que S2 réagit généralement mieux à l'ajout de dolomie. Ces analyses soulignent l'importance

du choix des matériaux de mélange pour optimiser la résistance au cisaillement et la capacité portante des sols stabilisés dans les applications de génie civil.

- **Influence sur la compacité** : les formulations F2 et F2' démontrent une haute fiabilité dans divers contextes de tests, illustrée par des taux de compacité remarquables. Pour le test S1 avec D1, F2 affiche une compacité de 96,96 %, signalant une excellente durabilité et résistance du remblai. En revanche, F2' dans S2 avec D1 présente une compacité encore plus élevée à 97,93 %, ce qui renforce sa résistance à la déformation et à l'affaissement. Lorsque l'on analyse les formulations avec la poudre D2, les compacités sont également excellentes, avec F2 à 96,91 % et F2' à 97,87 %. La formulation F2' affiche une meilleure performance en termes de résistance et de stabilité grâce à sa compacité supérieure. Avec la poudre D3, la compacité de F2 est légèrement inférieure (95,98 %) par rapport aux autres poudres, ce qui pourrait affecter les performances, tandis que F2' reste robuste avec 97,00 %, indiquant une bonne densité pour S2. Enfin, avec la D4, F2 atteint une compacité de 97,59 %, tandis que F2' révèle des performances exceptionnelles avec 99,27 %, propice à une excellente résistance mécanique et durabilité des sols sous charge.

En synthèse, les formulations F2 et F2' affichent des compacités globalement excellentes, F2' ayant fréquemment une supériorité qui lui confère une meilleure performance dans divers contextes d'application.

- **Influence sur la résistance à la compression** : les études sur la résistance à la compression des mélanges de sols S1 et S2 stabilisés avec les 4 différentes poudres de dolomie blanche montrent des résultats variés qui influencent leur efficacité pour des applications routières. Bien que le sol S1 montre une bonne amélioration par rapport à l'état non stabilisé avec ajout de D1 (R_c 3,5MPa), il présente des préoccupations en matière de plasticité. L'utilisation de D1 sur le sol S2 est hautement fiable pour les remblais routiers grâce à ses excellentes performances en termes de CBR, avec une R_c est égale à 3,6MPa. L'ajout de la poudre D4 sur les 2 types de sol S1 et S2 offre la meilleure résistance et stabilité parmi toutes les formulations, faisant de D4 un choix idéal pour des projets d'ingénierie dans la stabilisation des sols limoneux mal gradué pour être utilisé dans la construction des remblais routiers

Conclusion : l'utilisation de la poudre D4 est la meilleure option pour améliorer les propriétés mécaniques des sols S1 et S2, suivi de D1 et D2, qui offrent des performances acceptables. En revanche, D3 présente des résultats moins favorables, en particulier pour S1. Pour des applications routières, la formulation F2' (S2 + D4) est recommandée, tandis que F2 (S1 + D1) nécessite une attention particulière sur l'humidité pour éviter des problèmes potentiels.

IV. CONCLUSION

En conclusion, la stabilisation des sols limoneux mal gradués est une étape cruciale pour assurer la durabilité des remblais routiers, en particulier dans les zones exposées à des conditions climatiques défavorables. L'utilisation de dolomie s'est révélée particulièrement efficace, surtout pour le Sol 2, en améliorant la cohésion et en renforçant la résistance à l'eau, ce qui est essentiel en période de pluies intenses. L'intégration de dolomie dans la composition des sols permet d'optimiser leur densité et d'accroître leur indice CBR. Il est primordial de choisir le type de dolomie en tenant compte des conditions climatiques spécifiques et des exigences de charge portante. Parmi les différents types de dolomie testés, la poudre de dolomie de la quatrième référence (D4) a démontré des performances nettement supérieures, offrant une densité plus élevée, un meilleur indice CBR plus efficace. Par conséquent, pour des projets où la performance mécanique et la résistance sont de mise, l'adoption de la poudre de dolomie numéro 4 est fortement recommandée. Cette démarche soulève des perspectives prometteuses pour le renforcement des infrastructures routières, leur conférant une résilience accrue face aux défis posés par les changements climatiques. En intégrant ces solutions de stabilisation innovantes, nous pouvons garantir des routes plus durables et adaptées aux exigences d'un environnement de plus en plus variable.

REFERENCES

- [1] Ouedraogo Kouka Amed Jérémy. (2019). Stabilisation de matériaux de construction durables et écologiques à base de terre crue par des liants organiques et/ou minéraux à faibles impacts environnementaux. Thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse.
- [2] Ivanov, V. and Stabnikov, V. (2017). Biocementation and biocements. In *ConstructionBiotechnology*, pages 109–138. Springer
- [3] Edmond Andriambelomanga, (2006). Amélioration de la productivité des sols cultivés avec dolomie des collines du bassin versant de Maniandro, p. 581-590
- [4] Rakotomalala Miarintsoa Fetraniaina (2024). Étude De L'influence Des Débris De Coquillages Non Calcinés Et Calcinés Sur Les Remblais Routiers De La Zone Littorale EST De Madagascar. *International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)*. Vol. 46 No. 2 September 2024, pp. 61-82.
- [5] Rakotomalala Zolimboahangy, (2021). Études des caractéristiques et classification des termitières pour être valorisées et utilisées comme stabilisants des matériaux en terre crue, MADA-HARY, ISSN 2410-0315, vol. 10, 2021, 2021, pp 169 – 182.
- [6] Jehanne P., (2015) : Construction en terre crue : dispositions qualitatives, constructives et architecturales – Application à un cas pratique : Ouagadougou. Université de Liège – Faculté des Sciences Appliquées.