

CO-VALORISATION PAR MÉLANGE D'UN TUF CALCAIRE ET D'UN SABLE DE DUNE DE LA RÉGION D'OUARGLA : UTILISATION EN TECHNIQUE ROUTIÈRE SAHARIENNE

Meriem MORSLI, Ramdane BOUTEUMEUR, Messaouda CERRAK, Abderrahim BALI

Laboratoire Construction et Environnement, École Nationale Polytechnique,
10, Avenue Hacène Badi, El Harrach 16200, Alger, Algérie
meriem.ouhachi@yahoo.fr

1. INTRODUCTION

Le Sahara algérien représente un peu plus de deux millions de kilomètres carrés. Il est constitué d'environ 40 % de montagnes désertiques, 15 % de plaines désertiques et 30 % de dunes de sable, le reste étant constitué de Sebkhas, de Chotts, et couvre environ le tiers du continent africain [1].

Les matériaux disponibles localement sont principalement des tufs d'encroûtement, des sables de carrière, des arènes granitiques, des éboulis, limons, argiles et du sable de dune. Les ressources en granulats conventionnels sont quasi inexistantes [2-3]. Cependant, depuis près d'un demi-siècle, des milliers de kilomètres de routes économiques de désenclavement ont été réalisés avec succès, essentiellement en tufs d'encroûtements. Ces derniers sont

des matériaux de substitution extraits de gisements calcaires, gypseux ou gypso-calcaires. Les encroûtements calcaires occupent les zones semi-arides (de 350 à 100 mm de pluie par an), les encroûtements gypseux les zones hyper-arides (moins de 100 mm de pluie par an) et les encroûtements gypso-calcaires les zones intermédiaires. L'ensemble de ces formations constituent une suite évaporitique dans l'espace géographique s'étalant du Nord Sahara au Grand Sud [4-5].

La bonne tenue des routes construites à partir de ces tufs est à attribuer aux particularités de ces matériaux, aux conditions environnementales favorables (qualité des sols support, conditions pluviométriques) [6], aux recommandations de la Technique Routière Saharienne et au savoir faire des techniciens de la route [7-10] ; Des travaux de recherches ont été menés pour mieux tirer profit des avan-

tages offerts par ces matériaux [11-15]. Leur particularité essentielle tient à cette cohésion qu'ils tirent de l'affinité réciproque des éléments pulvérulents de calcaire et de gypse, après compactage et séchage. Ils ont également la propriété singulière de durcir en vieillissant, sans traitement [16-17]. Ce phénomène de durcissement s'expliquerait par une dissolution d'une partie des fines carbonatées et gypseuses dans l'eau de compactage en faveur d'une recristallisation lors de l'évaporation de cette dernière donnant naissance à des liens cimentés locaux [18]. Ce même processus serait également à l'origine de la formation des encroûtements d'où sont extraits les tufs [19]. C'est ce durcissement, appelé aussi auto-stabilisation, qui a permis l'utilisation en corps de chaussée des tufs d'encroûtements, malgré des caractéristiques géotechniques qui s'écartent des spécifications usuelles des pays tempérés.

Cependant les tufs sont trop sensibles à l'eau et à l'énergie de compactage ; en effet le durcissement disparaît quasi totalement par imbibition et performances chutent significativement pour légère baisse du taux de compactage. Par ailleurs un taux élevé de fines ($> 30\%$) provoque lors de l'opération de compactage un phénomène de feuillement rendant le matériau inutilisable en construction routière [20-26].

Le sable de dune, bien que disponible à profusion dans le Sud algérien, est un matériau qui présente des caractéristiques mécaniques très médiocres. Il est caractérisé par une composition minéralogique et granulaire quasi similaire sur toute l'immensité du désert : 95% de Silice au moins, 1 à 2 % de calcaire et des traces de différents oxydes. Les diamètres des plus gros éléments et des éléments les plus fins sont respectivement de l'ordre 0.5 mm et 0.04 mm. Le coefficient d'uniformité ($C_u = D_{60} / D_{10}$) et le coefficient de courbure ($C_c = D_{30}^2 / D_{10} \cdot D_{60}$) sont respectivement de l'ordre de 1.8 et de 10. Il s'agit donc d'un sable très mal gradué. Il ne contient pratiquement pas de traces d'argile. Il a une limite de liquidité W_l d'environ 25 et une limite de plasticité non mesurable. La valeur de l'équivalent de sable est supérieure à 60%. La valeur de bleu est autour de 0.1. La cohésion est quasi nulle, l'indice CBR aux valeurs optimales de l'essai Proctor modifié très faible [27]. Toutes ces caractéristiques rendent difficile son utilisation comme matériau de construction sans traitement préalable [28-29]. Sa valorisation a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche : stabilisation des argiles ; formulation de béton de sable de dune, de mortier, bétons ultra performants et autres [30-36]. En technique routière, l'acquisition de la stabilité des sables de dune peut être obtenue par un « blocage » des grains les uns par rapport aux autres, la qualité de ce blocage est variable. On peut envisager soit *un simple calage des grains* par incorporation d'une substance plus fine (cendre volantes, boue de papeterie) qui vient combler les vides de celui-ci, soit *un Calage et rigidification* par des techniques telles que les « sable-boue de papeterie – ciment ; sable-cendres volantes-ciment et sable-cendres volantes – chaux » soit une simple rigidification par prise hydraulique (sable – liant hydraulique), ou par prise thermique (sable-bitume) [37-43]. Une co-valorisation par mélange de matériaux ayant des caractéristiques complémentaires est également envisageable [44-45].

2. CARACTÉRISATION DES MÉTÉRIAUX D'ÉTUDE

Les deux matériaux d'étude proviennent de la région du Sud Algérien : Béchar pour le tuf et Ouargla pour le sable de dune.

L'identification géotechnique des tufs telle qu'elle est pratiquée actuellement dans les laboratoires routiers algériens s'effectue selon les normes admises en géotechnique classique, avec néanmoins certaines modifications selon les recommandations de la Technique Routière Saharienne :

- La détermination du pourcentage de gypse et/ou de calcaire est pratiquée sur la fraction granulométrique inférieure à 1 mm.
- L'analyse granulométrique s'effectue sur un échantillon qui aura été mis à détrempé dans un bac d'eau pendant 12 à 24 heures.
- Une coupelle rugueuse est préconisée pour la détermination des limites d'Atterberg.
- Lors des essais de compactage (essais Proctor), on ne réutilise pas le même échantillon pour les différents points de teneur en eau.
- La cohésion est appréciée par l'essai de compression simple réalisé sur des échantillons confectionnés dans des éprouvettes de 50 mm de diamètre et 100 mm de hauteur avec des matériaux de granularité 0/5 mm. Le compactage s'effectue statiquement à l'aide d'une presse de type CBR à la vitesse de 1,25 mm/mn, à différentes compacités, à la teneur en eau Optimale Proctor Modifiée. Les lectures sont notées toutes les 15 secondes.

Les résultats d'identification chimique, géotechnique et mécanique sont récapitulés dans le tableau suivant le tableau 1.

Comme décrit dans la bibliographie, le sable de dune de Ouargla présente un coefficient d'uniformité < 2 , pas de passants au tamis de $80\mu\text{m}$, un équivalent de sable > 70 , une classe granulaire serrée 0.2/0.4 mm et une granularité uniforme. Son indice CBR est faible et la cohésion de ce matériau est nulle (tableau 1 et figure 1).

Le Tuf de Bechar est à prédominance calcaire (81,64%). Le pourcentage de fines est $> 30\%$, seuil au delà duquel le compactage sur site devient difficile à accomplir (problème de feuillement) [8]. Le coefficient Los Angeles est élevé (50%), c'est un matériau friable et évolutif. Il appartient à la famille des matériaux sans ossature dont la tenue devrait être assuré par un minimum de cohésion (de l'ordre de 1.5 à 2.0 MPa) [8] ; la présence de fines calcaires est responsable de la faible valeur de l'équivalent de sable (4.83), toute fois la Valeur au Bleu (0.75) et l'indice de plasticité (16,2) dénotent une présence de fines argileuses non négligeables [46].

Les courbes granulométriques et Proctor modifié des deux matériaux sont données dans les figures 1 et 2.

Tuff : $\gamma_{\text{dmax}} = 1.98$; $W_{\text{opm}} = 11\%$

Sable : $\gamma_{\text{dmax}} = 1.74$; $W_{\text{opm}} = 9\%$

Le tuf de Bechar est plus dense que le sable de dune d'Ouargla mais ce dernier est moins sensible à la teneur en eau de compactage.

	Tuf de Béchar	Sable de dune
Composition chimique		
– Calcaire CaCO ₃ (%)	81,64	Traces
– Silice SiO ₂ (%)	17%	86%
Analyse granulométrique : NF: P 94-056 et 057		
– d/D	0/20	0.2 /0.4
– < 80 µm (%)	40%	1.3
– Coefficient d'uniformité : Cu (%)	x	1.5
– Coefficient de Hzen (courbure) : Cz (%)	x	11
Essai Los Angeles NF 18-573		
– Coefficient los Angeles LA (%)	55	x
Limites d'Atterberg : NF 94-051		
– Limites de liquidité : WL	40	23
– Limite de plasticité Wp	23.8	x
– Indice de Plasticité : Ip	16.2	x
Équivalent de sable NF P 18-598		
– Équivalent de sable : ES (%)	4.83	81.2
Valeur au bleu : NF P 94-068		
– Valeur au bleu : VB	0.75	0.1
Compactage et portance : NF P 94-093 et 078		
– Teneur en eau optimale : W _{optimal} (%)	11	9
– Densité sèche maximale $\gamma_{optimal}$	1.98	1.74
– Indice CBR après immersion (%) à 95% de compacité		5
– Résistance compression simple (MPa) à 95% compacité		0

Tableau 1 : Physical characteristics and mechanics of tuff Bechar and dune sand Ouargla.

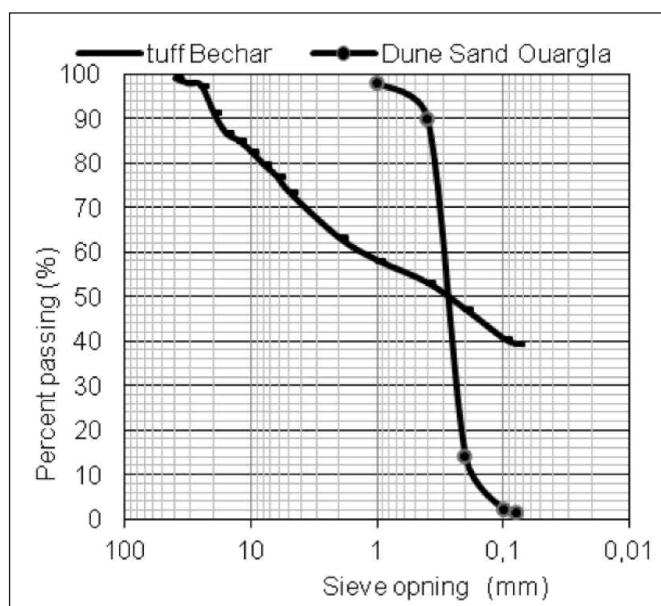


Figure 1 : Courbes granulométriques du sable et du tuf.

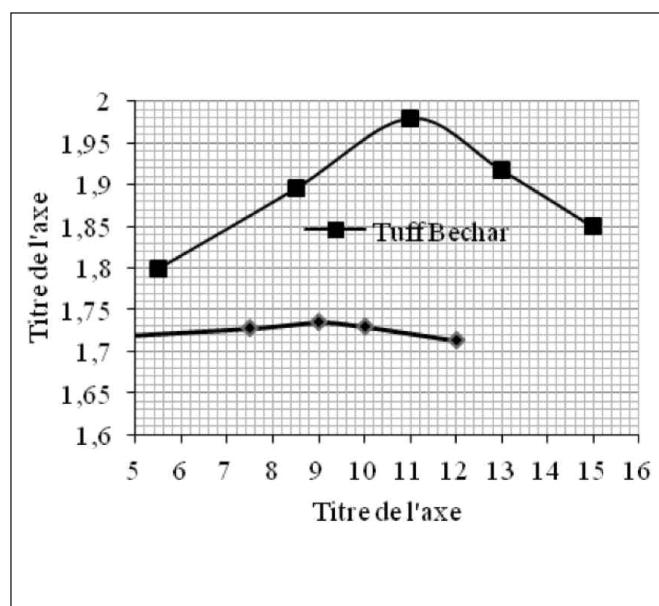


Figure 2 : Courbes Proctor du sable et tuf.



3. MÉTHODOLOGIE

Pour supplier aux insuffisances de chacun des deux matériaux, on a procédé à une co valorisation par mélange des deux substances à divers taux.

Il s'agit de suivre l'évolution des caractéristiques géotechniques et mécaniques des mélanges « tuf – sable ». Les critères de jugement des formules sont par ordre de priorité [8] :

- Une résistance maximale,
- Un taux de fines minimal,
- Une plasticité minimale,
- Une densité maximale,
- Une portance maximale.

L'étude se fera dans l'intervalle des compacités usuelles observée sur chantier, à savoir (95% à 98%). Pour rappel, la compacité est le rapport de la densité du matériau en place à la densité sèche maximale Proctor modifié.

Les mélanges sont testés à 0 ; 5 ; 15 ; 25 et 35 % d'incorporation du sable de dune.

Le pourcentage de fines, l'équivalent de sable, la valeur au bleu et l'indice de plasticité sont évalués pour chaque taux d'incorporation de sable.

Les courbes Proctor modifié sont tracées pour chaque taux d'incorporation de sable et les caractéristiques Proctor relevées.

Les éprouvettes sont ensuite confectionnées à la teneur en eau optimale Proctor modifié de chaque mélange mais à différentes compacités.

Les compacités théoriques visées sont : - 95 - 96 - 97 et 98 % à raison de 03 éprouvettes par taux d'incorporation de sable. Les compacités « vraies » sont ensuite évaluées pour chaque éprouvette testée.

Les courbes expérimentales sont tracées en fonction des compacités vraies des éprouvettes.

L'analyse des résultats et les discussions sont établies sur la base des courbes déduites des graphes expérimentaux.

Les performances mécaniques sont analysées en fonction d'une part, du taux d'incorporation de sable et, d'autre part, du taux de compacité.

4. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

4.1. Taux de fines et argilosité des mélanges

L'incorporation du sable de dune a permis d'abaisser l'indice de plasticité, le % de fines l'équivalent de sable et la valeur au bleu (figure 3, a, b, c et d). Tous ces indices ont évolué d'une manière à favoriser, à priori, le compactage des mélanges.

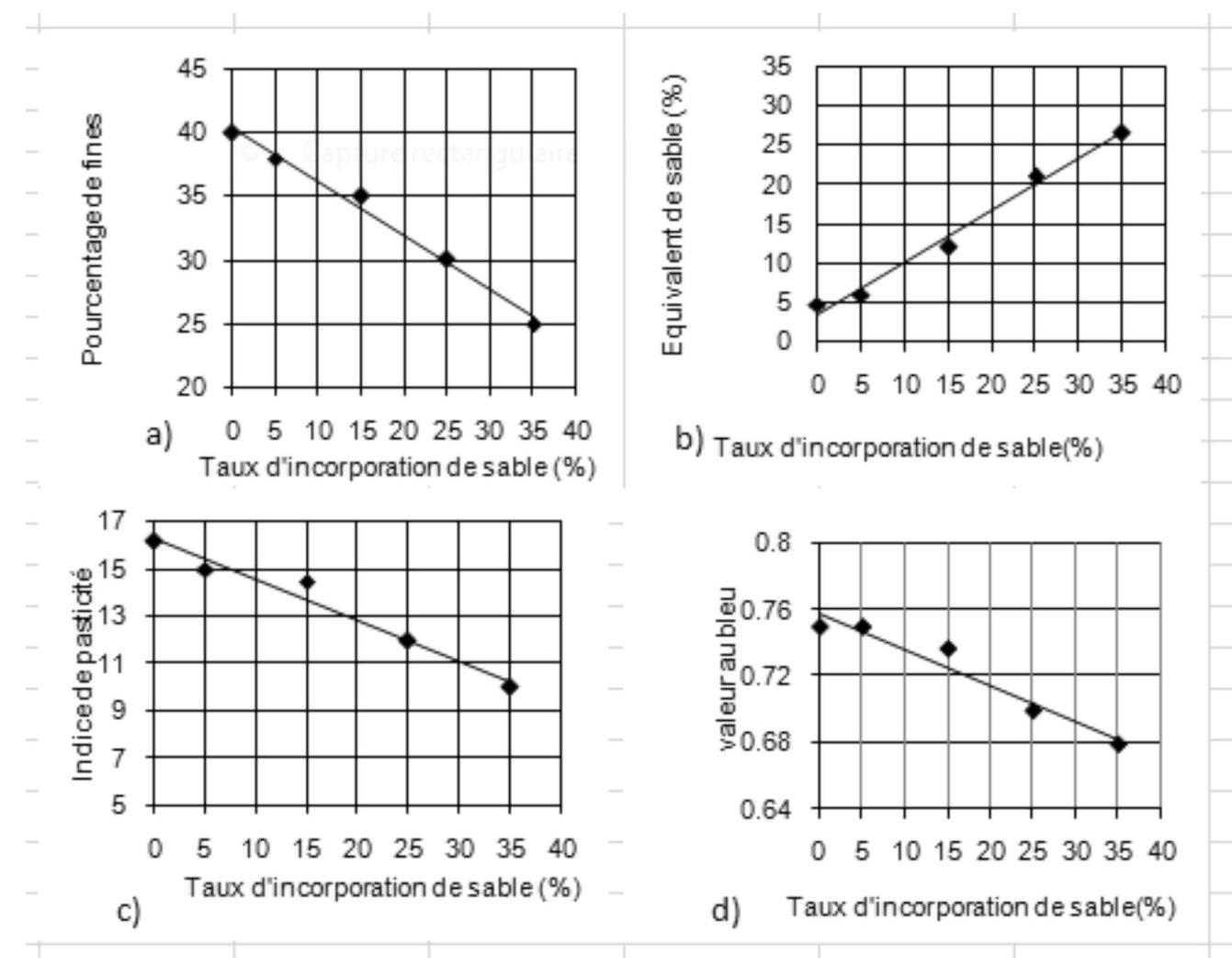


Figure 3 : Évolution des caractéristiques des mélanges en fonction du taux d'incorporation de sable ; a) Évolution du pourcentage des fines ; b) Évolution de l'équivalent de sable ; c) Évolution de l'indice de plasticité ; d) Évolution de la valeur au bleu.



4.2. Aptitude au compactage des mélanges

L'ajout de sable de dune déplace les courbes Proctor modifiée vers la gauche (Figure 4), avec une amélioration des caractéristiques optimales : réduction de la teneur en eau et augmentation de la densité sèche (Figures 5 et 6). Ce comportement est similaire au comportement classique des matériaux compactés à différentes énergies [47].

Ce phénomène peut trouver une explication dans la réduction du taux de fines et leur remplacement par des particules qui, de part leur forme et leur taille, facilite leur déplacement en les orientant de façon à former une structure plus dense.

Au-delà d'un certain taux (25% dans notre cas) le sable ne joue plus le rôle de lubrifiant et tend à remplacer le matériau de base en imposant ses propres caractéristiques. A terme, la densité devrait tendre vers celle du sable.

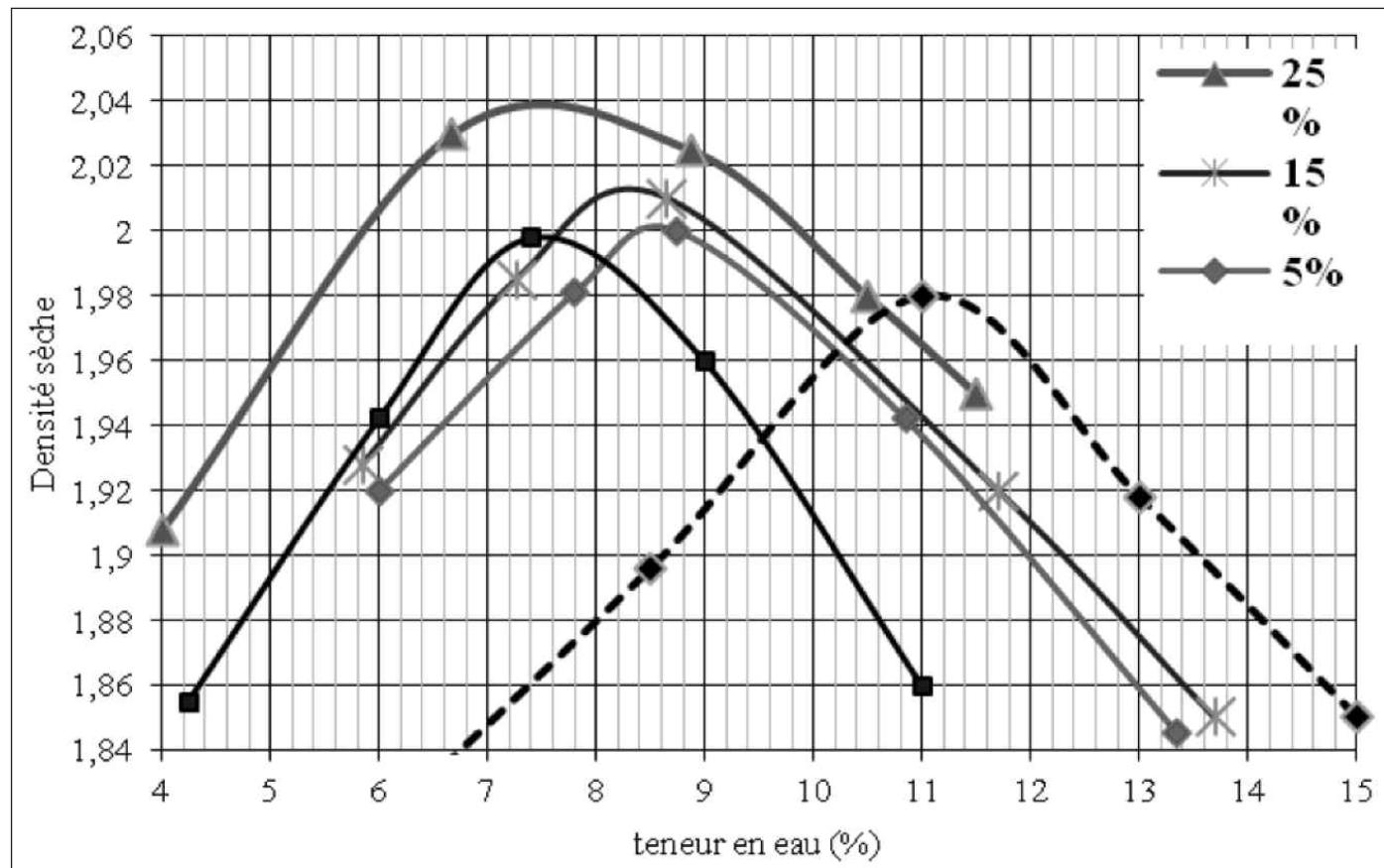


Figure 4 : Influence de l'ajout de sable sur les courbes Proctor modifiée.

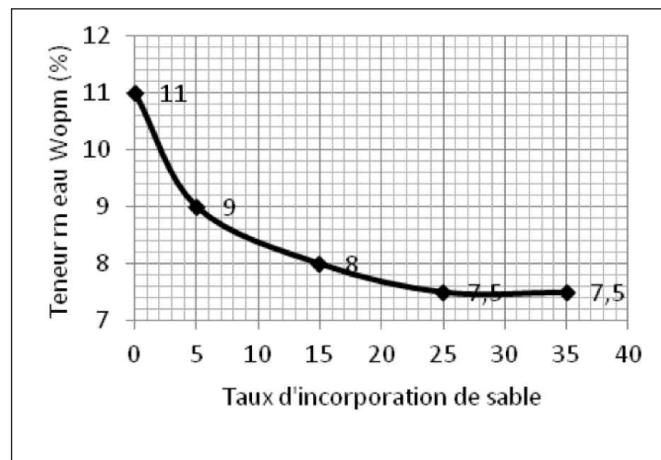


Figure 5 : Variation de la teneur en eau de compactage.

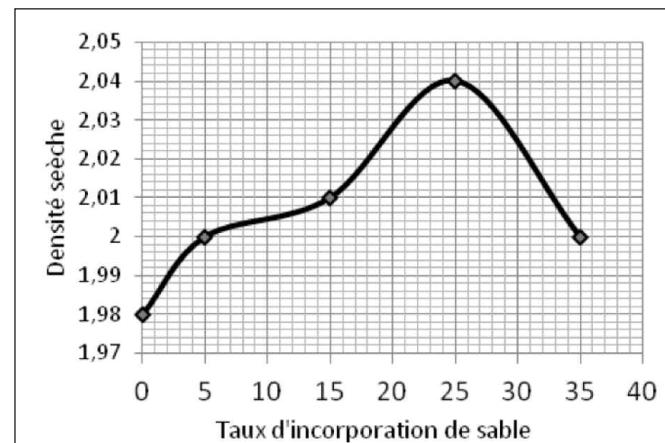


Figure 6 : Variation de la densité sèche optimale en fonction du taux d'incorporation de sable.

4.3. Évolution de l'indice CBR (I_{CBR})

– Indice CBR en fonction de la compacité

On remarque une linéarité des résultats en fonction de la compacité, linéarité confirmée par les courbes tendances de la figure 7 et des équations du tableau 2.

Le matériau « sable de dune –tuf » reste aussi sensible que le tuf sans ajout aux taux de compactage : une chute de compacité de trois points (de 98 à 95 %) fait chuter l'indice CBR de 38%, voir plus de 40% pour les 35% d'ajout de sable. L'ajout de sable n'atténue pas l'étroite dépendance entre la portance et le taux de compactage.

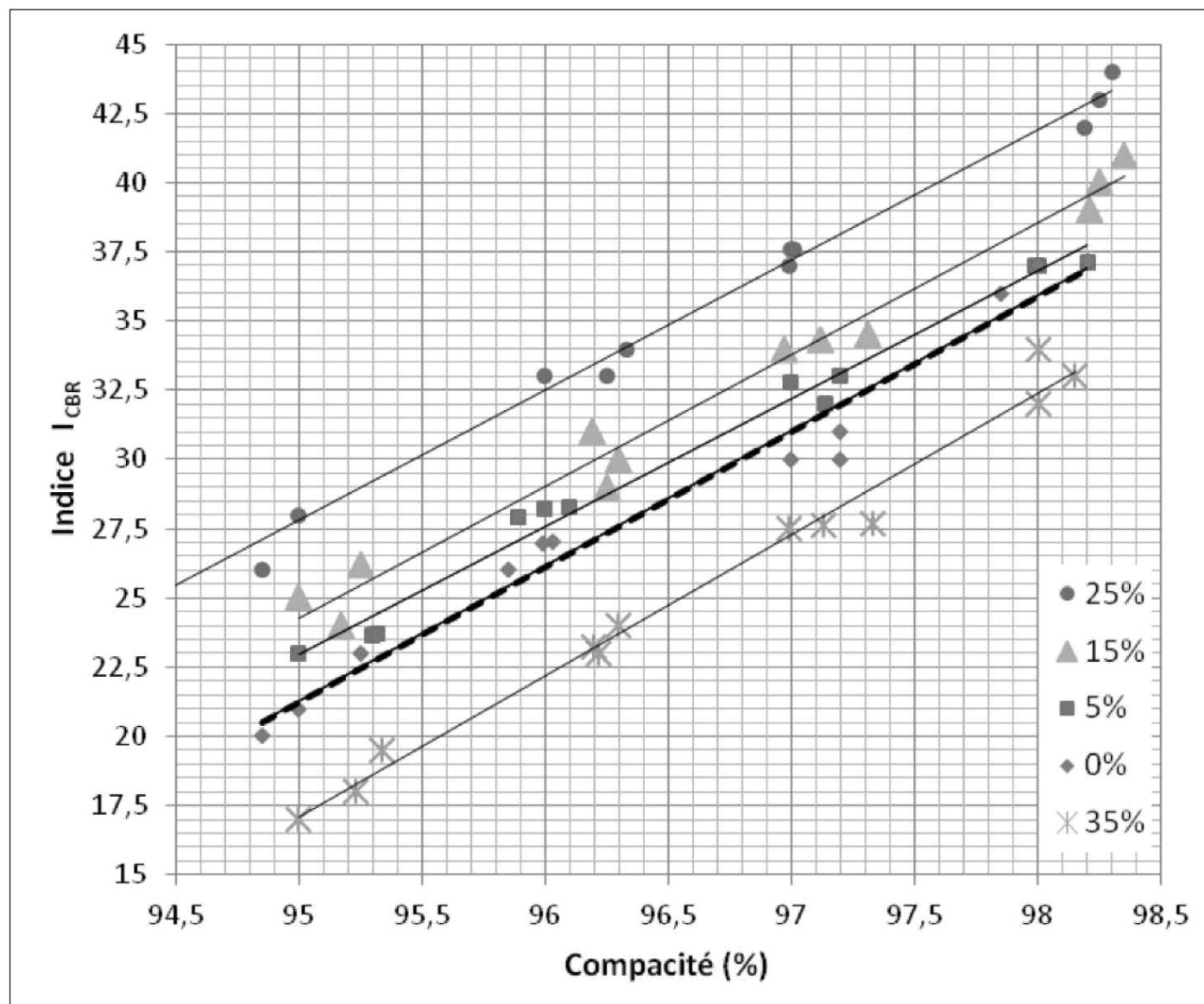


Figure 7 : Variation de l'indice CBR des mélanges, en fonction de la compacité.

	Équations courbes tendance	Indice I_{CBR} à ≠ compacités				$\frac{I_{CBR98} - I_{CBR95}}{I_{CBR98}}$
		95%	96%	97%	98%	
0%	$I_{CBR} = 4.889 C (\%) - 443.2$ $R^2 = 0.973$	21.25	26.14	31	35.92	40%
5%	$I_{CBR} = 4.613 C (\%) - 415.3$ $R^2 = 0.987$	22.93	27.54	32.16	36.77	38%
15%	$I_{CBR} = 5.362 C (\%) - 486.8$ $R^2 = 0.991$	22.59	27.95	33.31	38.67	41%
25%	$I_{CBR} = 4.694 C (\%) - 418.1$ $R^2 = 0.990$	27.83	32.52	37.22	41.91	33%
35%	$I_{CBR} = 5.110 C (\%) - 468.3$ $R^2 = 0.985$	17.15	22.26	27.37	32.48	47%

Tableau 2 : Équations des courbes tendances et des Indices CBR à différentes compacités.

– Indice CBR en fonction du taux d'incorporation de sable

Pour mieux apprécier l'évolution de l'indice CBR en fonction du taux d'incorporation de sable, nous avons tracé les graphes (Figure 8) à partir des résultats du tableau 2.

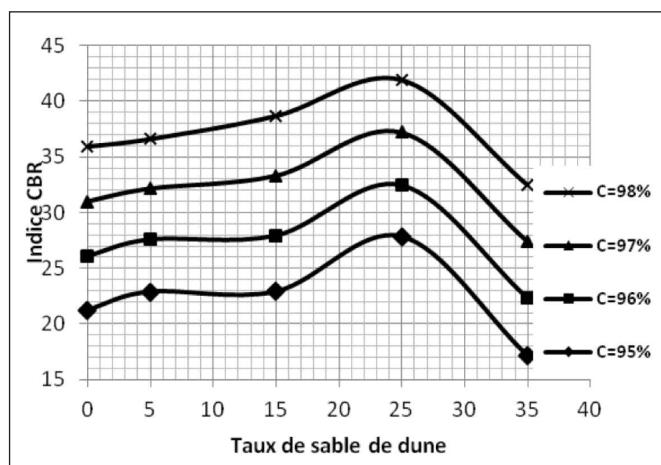


Figure 8 : Indice CBR en fonction du taux d'incorporation de sable, à différentes compacités.

On note que :

D'une manière générale, l'ajout de sable améliore l'indice CBR quelque soit la compacité. Toute fois, l'allure des courbes est différente de celle des courbes de résistance à la compression simple (Figure 10). Pour cet essai, le poinçonnement se fait après imbibition, sans séchage préalable : le phénomène de durcissement n'intervient pas. Un nouvel arrangement des grains peut justifier ce gain de portance. En effet, jusqu'à 25% d'ajout, le sable joue un rôle de correcteur granulométrique et/ou de fluidifiant, réduisant la quantité d'eau de compactage, améliorant la densité sèche, réduisant l'argilosité et le pourcentage de fines, éléments favorables à l'amélioration de la portance des mélanges (Figure 8). Au-delà, les caractéristiques du sable commencent à s'imposer, entraînant une chute appréciable des indices CBR.

4.4. Résistance à la compression

– Résistance à la compression simple en fonction de la compacité

Toutes les courbes sont ascendantes : la résistance croît avec la compacité d'une manière quasi linéaire pour tous les taux d'incorporation de sables étudiés (Figure 9, Tableau 2).

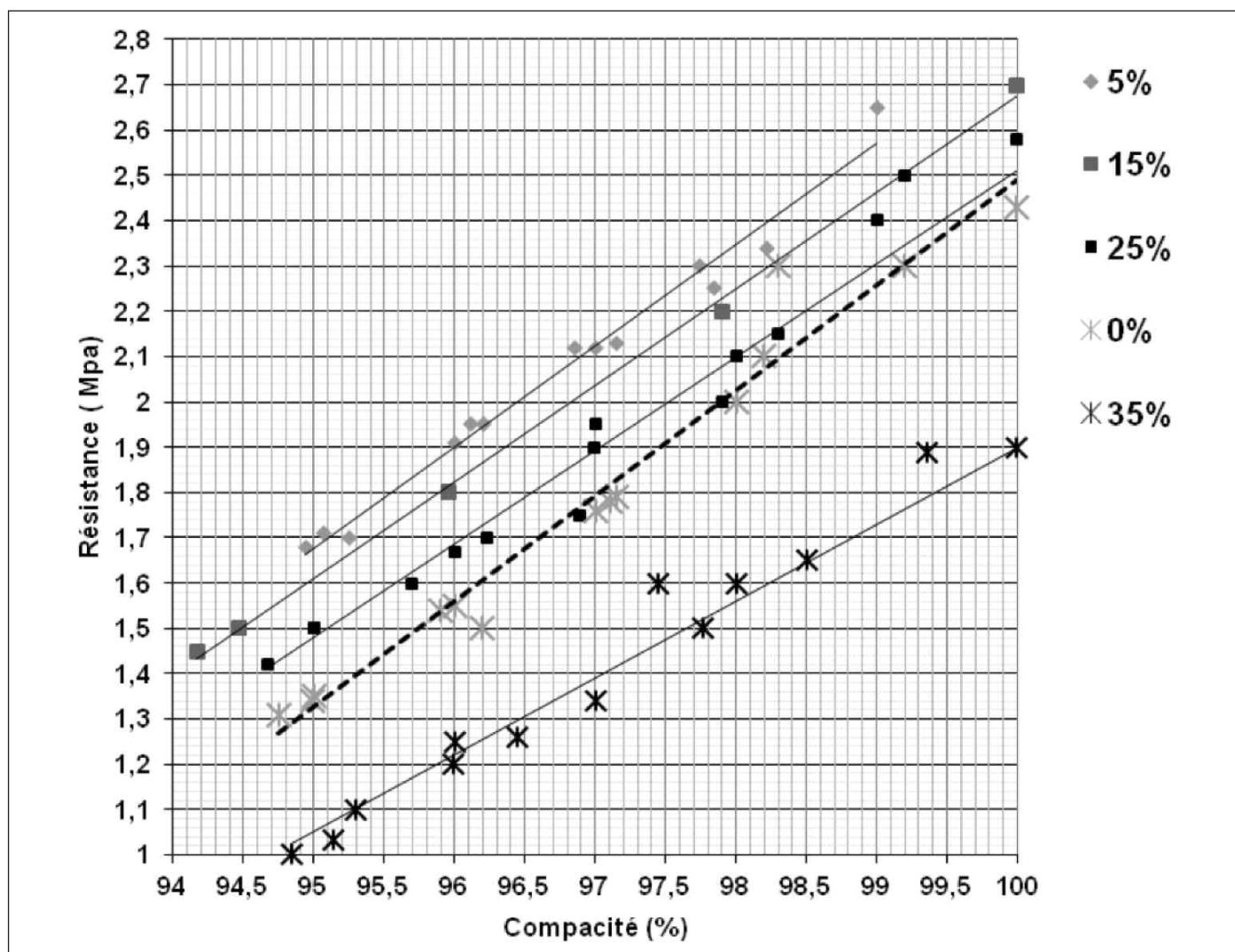


Figure 9 : Variations de la résistance des mélanges en fonction de la compacité.

L'ajout de sable n'a pas réduit cette dépendance : on note une baisse d'environ 30% de la résistance en compression simple pour une baisse de compacité de 3%. Tableau 3.

– Résistance à la compression simple en fonction du taux d'ajout de sable

Toutes les courbes présentent la même allure. Elles passent toutes par un maximum à 5% d'ajout. Jusqu'à 25% d'ajout, elles sont toutes au dessus de la ligne représentant la résistance du tuf sans ajout à 95% de compacité.

En effet :

A 5%, les grains de sable ne semblent pas affecter la propriété particulière du tuf à développer une cohésion après compactage et séchage. Par contre ils jouent le rôle de fluidifiant et de réducteur d'eau : la teneur en eau optimale de compactage est inférieur à celle du tuf sans ajout : W_{optm} (tuf + 5% sable) = W_{optm} (tuf sans ajout) - 2% ; or cette quantité correspond à la teneur en eau optimale développant la cohésion maximale du matériau [18]. Ce phénomène s'est reproduit à différentes compacités faisant varier la résistance entre 1.7 et 2.33 MPa.

	Équations des courbes tendance	Indice I_{CBR} à différentes compacités				$\frac{I_{CBR98} - I_{CBR95}}{I_{CBR98}}$
		95%	96%	97%	98%	
0%	$R_c = 0.232 C\% - 20.76 R^2 = 0.995$	1.28	1.51	1.74	1.98	35%
5%	$R_c = 0.223 C\% - 19.52 R^2 = 0.983$	1.66	1.89	2.11	2.33	29%
15%	$R_c = 0.213 C\% - 18.67 R^2 = 0.985$	1.56	1.78	2.00	2.20	29%
25%	$R_c = 0.206 C\% - 18.13 R^2 = 0.985$	1.44	1.65	1.85	2.05	30%
35%	$R_c = 0.169 C\% - 15.06 R^2 = 0.982$	1.00	1.16	1.33	1.50	33%

Tableau 3 : Équations des courbes tendances des Résistances en fonction de la compacité.

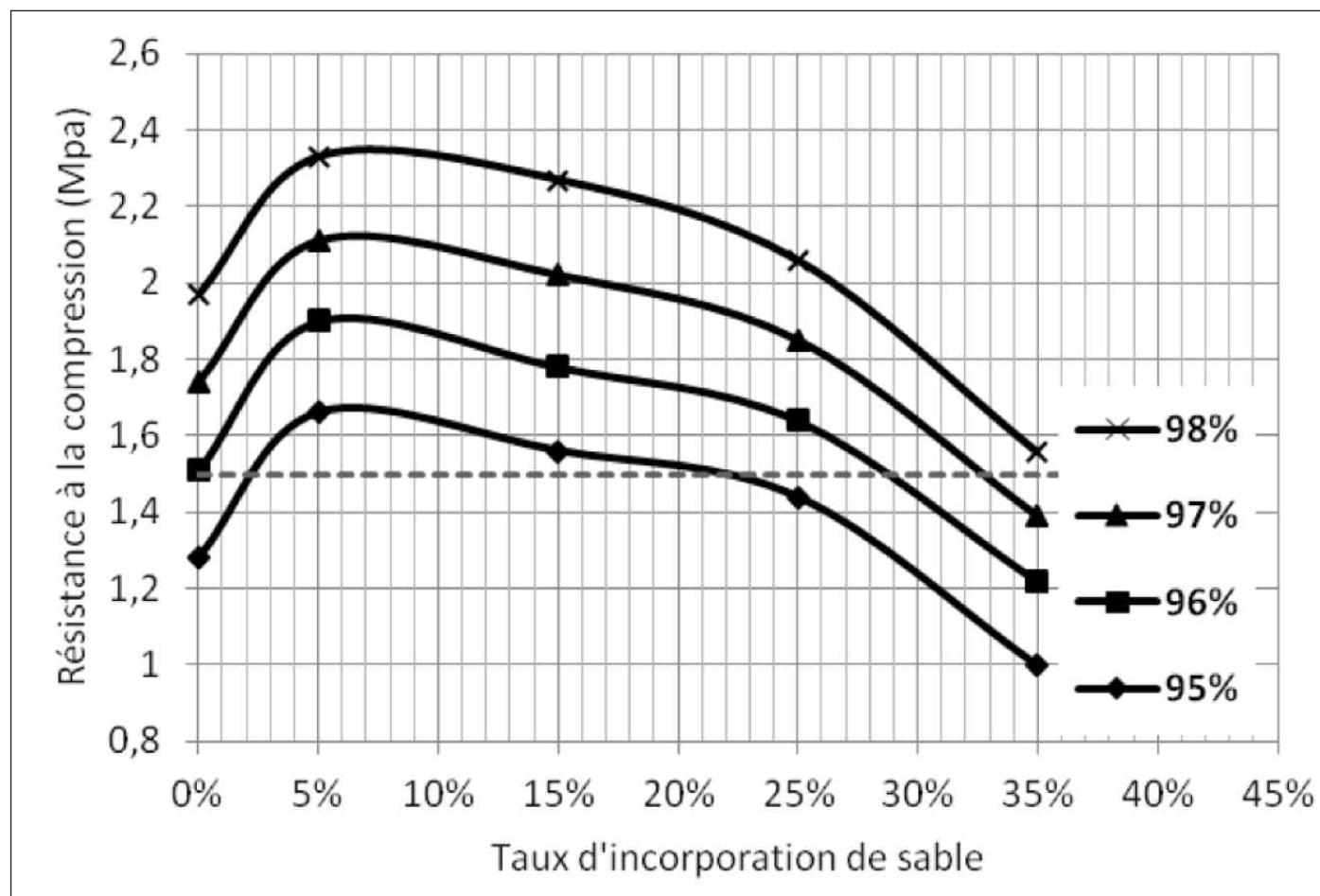


Figure 10 : Variation de la Résistance en compression simple en fonction du taux d'incorporation de sable, à différentes compacités.



Au-delà des 5%, les teneurs en eau de compactage diminuent et deviennent insuffisantes pour assurer la dissolution de la partie des fines carbonatées nécessaires au développement de liens cimentés locaux ce qui entraîne une baisse progressive de la résistance.

Lorsque le taux de sable atteint des valeurs appréciables (> 25%), la baisse de la teneur en eau de compactage et la

réduction du taux de fines carbonatées remplacées par des particules de sable de dune se conjuguent pour contribuer à réduire d'une façon appréciable la cohésion des mélanges.

4.5. Tableau récapitulatif des caractéristiques des mélanges

Taux d'incorporation de sable		0% (Tuf)	5%	15%	25%	35%	100% (Sable)	TRS*
Densité sèche optimale		1.98	2.00	2.01	2.10	2.00	1.74	>1.70
Teneur en eau optimale (%)		11	9	8	7.5	7.5	9	/
Teneur en fines (%)		40	38	30	25	20	0%	<30%
Equivalent de sable (%)		4.83	5	6	12	24	81.2	/
Valeur au bleu		0.75	0.74	0.73	0.70	0.68	0.1	/
Indice de plasticité (%)		16.2	15	14	12	9.5	/	<13
R_c en MPa à différentes compacités	95%	1.28	1.66	1.55	1.44	1	0	> 1.50
	96%	1.51	1.89	1.78	1.65	1.16	0	
	97%	1.74	2.11	2.00	1.85	1.33	0	
	98%	1.98	2.33	2.20	2.05	1.50	0	
I_{CBR} à différentes compacités	95%	21.25	22.89	22.90	27.87	17.15	/	/
	96%	26.1	27.6	27.95	32.5	22.3	/	
	97%	31	32.16	33.31	37.22	27.37	5	
	98%	35.92	36.6	38.67	41.91	32.48	/	

Tableau 4 : Caractéristiques géotechniques et mécaniques des différents mélanges.

* Seuils imposés par la Technique Routière Saharienne (TRS).

5. CONCLUSIONS / PERSPECTIVES

La co-valorisation d'un sable de dune et d'un tuf calcaire par simple mélange répond à un principe de base en technique routière qui consiste à utiliser au maximum des matériaux locaux.

Dans le cadre de cette étude on note que l'incorporation de sable de dune améliore la densité, la densité et la portance des mélanges sans toute fois atténuer la dépendance de ces caractéristiques vis-à-vis de la compacité.

La formule optimale du mélange est de « 75% de tuf + 25% de sable » pour une compacité de 96% ; dans ces conditions, la teneur en fine passe de 40% à une teneur acceptable de 25%, l'indice de plasticité de 16.2 à 12. La teneur en eau de compactage baisse de 36 % et l'indice CBR augmente de 30%, la résistance à la compression simple et la sensibilité du matériau élaboré vis-à-vis de

la compacité sont quasi identiques à ceux du tuf sans ajout.

Ce taux peut être relevé à « 70% de tuf + 30% de sable » à condition d'assurer un compactage qui garantisse au matériau en place 98% de la densité Proctor Modifié.

Une stabilisation du matériau « tuf-sable de dune » pourrait augmenter le taux de sable dans le mélange.

Cette étude pourrait être étendue à d'autres types de tufs afin de cerner les facteurs influençant le taux optimal d'incorporation de sable de dune.

Des études complémentaires portant notamment sur la mise en œuvre et sur le comportement à long terme du « tuf-sable de dune » sont nécessaires pour normaliser la procédure.

La technique de stabilisation par mélanges de matériaux ouvre des perspectives qui permettront de valoriser les matériaux locaux dans les régions dépourvues de matériaux classiques.



BIBLIOGRAPHIE

- [1] FOOKS P. G., HIGGINBOTHAM I. E., 1968, blem oh construction aggregates in desert areas with particular reference to the Arabian peninsula, Proc. Inst. Civil Engs, vol. 68,1, pp 39-67 et 69-90].
- [2] MORSLI M., KETTAB R., BALI A., FLEUREAU J. M., 2002. *Prospection des matériaux sahariens*, Journées Nationales de Géotechnique et de géologie de l'ingénieur, Nancy. OR THMPOR.
- [3] MORSLI M., KETTAB R., BALI A., FLEUREAU J. M., 2000. *Valorisation des matériaux locaux*, Conférence Internationale de Géo engineering, USTHB, Alger.
- [4] DJILI K., 1999 – Analyse de la distribution verticale et spatiale du calcaire dans les sols de l'Algérie Septentrionale – Revue Étude et Gestion des Sols, pages 201à 213.
- [5] GUETTOUCHE M.S., GUENDOUZ M., BOUTIBA M., 2006 – Sur l'existence d'un modèle- type d'encroûtements des sols arides et semi-arides d'Algérie – Journal des sciences pour l'ingénieur. N°6, p. 65-80.
- [6] MORSLI M., BALI A., FLEUREAU J. M., 2002. *Conception et réalisation des chaussées en milieu désertique*, Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, Nancy OR THMPOR.
- [7] FENZY E., 1966. *Particularité de la technique routière au Sahara*. Revue générale des routes et aérodromes, N° 411, p. 57-71.
- [8] FENZY E., 1970. *L'état actuel de la Technique Routière au Sahara*. Rapport technique, Direction de l'Infrastructure de l'Organisme Saharien, Ministère des travaux publics, Algérie.
- [9] CTTP., 2001. *Catalogue de Dimensionnement des Chaussées neuves*. Organisme National de Contrôle Technique des Travaux Publics, Algérie.
- [10] STRUILLOU L, ALLOUL B., 1984 – Valorisation routière des tufs d'encroûtements en Algérie – Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Symposium International sur les Granulats.
- [11] KHELOU A., 2011. *Modélisation du comportement des matériaux sable gypse-calcaire*, Mémoire de Magister. Algérie.
- [12] AMERAOUI Z., 2000. *Tufs d'encroûtements : utilisation dans la géotechnique routière*. Thèse de Magister, ENP, Alger.
- [13] CHERRAK M., MORSLI M., SILHADI K., BALI A., 2008. *Valorisation de l'utilisation des tufs calcaires en techniques routière*, Colloque International « Caractérisation et Modélisation des Matériaux et Structures – CMMS08 –.
- [14] GOUAL I., GOUAL M.S., ABOU-BEKKR N., TAIBI S., 2011. *Effet de l'ajout des déchets de carrière sur les propriétés physico-mécaniques du tuf de la région de Laghouat- Algérie*. Annales du Bâtiments et des Tavaux Publics, N° 2, pp 33-41.
- [15] ALLOUL B., 1981. *Étude géologique et géotechnique des tufs calcaires et gypseux d'Algérie en vue de leur valorisation routière*. Thèse de doctorat 3^e cycle, Université de Paris VI.
- [16] BEN DHIA M.H., 1983. *Les tufs et encroûtements calcaires dans la construction routière*. Thèse de docteur de 3^e cycle, Université de Paris VI.
- [17] METTAI M. 2009, *Caractérisation et étude du durcissement d'un sable gypseux de Ben Guencha, dans le domaine de la géotechnique routière*, Mémoire de Magister, ENP, Alger.
- [18] MORSLI M., BALI A., Bensaibi M., GAMBIN M., 2007. *Étude du durcissement d'un tuf d'encroûtements de Hassi-Messaoud, Algérie*. Revue Européenne de Génie-Civil, Volume 11, n° 9-10.
- [19] GUETTOUCHE M.S., GUENDOUZ M., BOUTIBA M., 2006. *Sur l'existence d'un modèle-type d'encroûtements des sols arides et semi-arides d'Algérie*. Journal des sciences pour l'ingénieur. N°6, p. 65-80.
- [20] HACHICHI A., BOUDIA M., MALI M., 2000. *Étude de l'influence du séchage et de l'immersion sur la résistance à la compression simple des tufs calcaires de la région d'Oran*. Conférence Internationale de Géo engineering, USTHB, Alger
- [21] BASLIMANE B., 1994. *Étude en laboratoire du comportement des sables gypseux*. II^e séminaire : les techniques routières sahariennes, Beni Abbès.
- [22] MORSLI M., 2007. *Contribution à la valorisation des tufs d'encroûtements en Technique Routière Saharienne*, Thèse de Doctorat d'Etat, École Nationale Polytechnique. Alger.
- [23] GOUAL I., GOUAL M.S., GUEDDOUDA M.K., FERHAT A., 2008. Effect of treatment with lime and cement to the mechanical behavior of calcareous tuffs: for use in pavement layers in the region of Laghouat- Algeria. International conference on construction and building technology –A- pp 101-112.
- [24] OULD SAID A.C., HAVARD H., VALIN C., 1995. Terrassement routiers dans les sables de dunes de Mauritanie, Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 199, pp. 27-34.
- [25] BERTOZZI J., 1989. Comportement mécanique d'un sable homométrique stabilisé. Revue Française de Géotechnique. N° 60, pp 51-59.
- [26] CHAUVIN J.J., 1987. *Les sables*, Guide pratique d'utilisation routière-. Synthèse, ISTED.
- [27] LEGHRIEB Y., MITICHE R., BENTEBBA M.T., DJOUHRI M., KRIKER A., 2012. The manufacture of raw brick from the saharan sand based mortar of ouargla (located in the septentrional Sahara, Algeria) from use in arid regions" Arabian Journal for Science and Engineering, ISSN 1319-8025 Volume 37 Number 8 Arab J Sci Eng 37:2149-2161 DOI 10.1007/s13369-012-0305 3.
- [28] KETTAB R. BALI A. 2011. *Caractéristiques et durabilité d'un béton de sable de dunes et d'un béton ordinaire modifiés à la poudrette de caoutchouc* ; 2^e Congrès International sur la Technologie et la Durabilité du Béton CITEDUB 2, USTHB, ALGER.
- [29] TAFRAOUI AHMED, 2009, Contribution à la valorisation du sable de dune de l'erg occidental (Algérie). Application aux nouveaux bétons, thèse de doctorat, INSA DE TOULOUSE.
- [30] KETTAB R., BALI A., ALLICHE A. 2007. Modified Sand concrete for waste management revue INJSET InderScience International. Journal. Nuclear Energy Science and Technology, Vol. 3, No. 1.
- [31] BENNA Y., GUETTACHE B., BEDJOU S., AIT SAID S., BRARA A., 2006. *Valorisation des sables de dune, propriétés physico-mécanique des mortiers à base de sables de dune*. 3^e séminaire sur les technologies du béton : le Béton, du Traditionnel à la Haute Performance. Alger.
- [32] BENABED B., AZZOUZ L., DAMENE Z., 2005. Comportement mécanique et durabilité des mortiers à base de sable de dune. Colloque CMEDIMAT, ALGERIE.
- [33] GUEDDOUDA M.K, ABOU-BEKR N., TAIBI S., ARAB R., 2011. Hydric behavior of dune sand - bentonite barrier. Rencontres Géosynthétiques.

- [38] MITICHE R., MORSLI M., BOUTEMEUR R., LAAKEL A. *Stabilisation physico-chimique des sols fins au lignosulfonate*. Séminaire International « Innovation et Valorisation dans le Génie Civil » 5 – 7 février 2009.
- [39] CHERRAK M., MORSLI M., SILHADI K., BALI A., 2008. *Valorisation de l'utilisation des tufs calcaires en techniques routière*. Colloque International «Caractérisation et Modélisation des Matériaux et Structures – CMMS08 –.
- [40] AZZOUZ L., BOUHICHA M., KHENFER M., 2001 – *Stabilisation physico-chimique d'un sol sableux* –A.J.O.T, International publication, Série A, Vol. 13, N° 1, pp.47-53. Bourokba S.
- [41] FREER-HEWISH R. J., GHATAORA G. S., NIAZI Y. 1999. *Stabilization of desert sand with cement kiln dust plus chemical additives in desert road construction*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Transport ISSN 0965-092X, vol. 135, no1, pp. 29-36.
- [42] AL-ABDUL WAHHAB H.I, ASI I.M., 1997. *Improvement of marl and dune sand for highway construction in arid areas* Building and Environment, Volume 32, Issue 3, pp 271–279.
- [43] FUMET P., 1959. *Chaussées en sable gypseux et en sables stabilisés chimiquement*, Revue générale des routes et aérodromes, Numéro spécial « Sahara », 329, pp. 169-178.
- [44] Ben Dhia M.H. (1998). *Quelques particularités de l'utilisation du sable de dune en construction routière en milieu saharien*. Bulletin de liaison du laboratoire pont et chaussée, 123, jan.-fev. 1998.
- [45] CHAUVIN J.J. (1987). *Les sables – guide pratique d'utilisation routière*. ISTED.
- [46] COLOMBIER G., 1988 – Tufs et encroûtements calcaires : Utilisations routières – Synthèse, ISTED.
- [47] HOLTZ R. AND KOVAKS W., 1996. Introduction à la géotechnique, Édition de l'École Nationale Polytechnique de Montréal, pp 808.