

Quelques particularités de l'utilisation du sable de dune en construction routière en milieu saharien

Mohamed Habib BEN DHIA
Docteur en mécanique appliquée à la construction
(Université Pierre et Marie Curie Paris VI)
Maître assistant
École Supérieure des Sciences et Techniques de Tunis

RÉSUMÉ

Cet article présente certaines spécificités de la construction routière en contexte saharien. Une attention particulière est portée au climat, aux sols sahariens, aux matériaux locaux de construction et à certaines contraintes imposées par ce milieu. L'étude de laboratoire décrite porte sur l'incorporation du sable du désert dans les matériaux routiers et l'analyse de l'effet de la salinité sur le comportement de ces matériaux et sur leur compactage. Les résultats des essais géotechniques présentés permettent de conclure que le sable du désert peut être inclus dans les matériaux routiers jusqu'à un pourcentage de l'ordre de 25 % et que la salinité provenant de l'eau de compactage ou d'une nappe superficielle n'affecte pas, d'une manière sensible, les caractéristiques géotechniques des matériaux du corps de chaussée.

MOTS CLÉS : 52-42 - Construction routière - Désert - Afrique - Matériaux locaux - Sable - Dune - Laboratoire - Essai - Comportement - Sel (chim.) - Eau - Compactage - Revêtement (chaussée) - / Sahara.

Introduction

La construction routière en milieu désertique est devenue un besoin actuel, urgent et de plus en plus important. Les régions désertiques ont toujours été les plus démunies dans le monde à cause de leurs conditions climatiques difficiles et de l'absence totale de ressources naturelles en surface. La présence de l'homme y est très faible aussi, ce qui a limité les projets de construction et d'infrastructure de toute sorte. Mais les hommes commencent à mieux explorer ces régions et à y investir pour une exploitation plus large de ce que nous offre la nature. Dans le Sahara maghrébin surtout, plusieurs activités sont nées, comme :

- la prospection et l'exploitation du sous-sol ;
- le tourisme saharien ;
- l'alimentation et le développement de ces nouveaux marchés.

Ces activités se sont accompagnées par une forte volonté de sédentarisation des populations nomades autour de certains points ou pôles devenus stratégiques.

Il est, par conséquent, nécessaire de développer le réseau routier dans les régions sahariennes. Cependant, le milieu saharien présente non seulement les conditions les plus défavorables au développement économique et humain, mais aussi des particularités techniques pour la conception et la réalisation des routes.

Cet article présente d'abord les aspects particuliers du contexte saharien en construction routière, puis décrit des travaux sur l'utilisation des matériaux locaux sahariens avec l'incorporation du sable de dunes et la prise en compte de la salinité dans les travaux de terrassements.

L'environnement saharien

Le Sahara fait partie des régions désertiques chaudes. Sa plus grande partie se trouve dans le continent africain, mais il se prolonge en Arabie et au-delà du golfe Persique (fig. 1).

L'environnement saharien est caractérisé essentiellement par son climat, sa végétation et par la nature et les caractéristiques des matériaux et des sols de surface.

Le climat saharien

On connaît dans le monde trois niveaux d'aridité : semi-aride, aride et extrêmement aride. Le dernier est celui du Sahara.

- **L'aridité** est un aspect du climat mondial dépendant de particularités bien établies de la circulation atmosphérique générale. C'est un régime quasi stable et qui ne peut être modifié d'une manière significative à l'échelle d'une vie humaine. On estime qu'une variation climatique périodique ou apériodique importante, due aux changements de l'insolation, a besoin d'une durée de 10 000 ans à un million d'années pour produire des effets durables.

- À notre époque, le climat saharien a des **températures** très hautes le jour et faibles la nuit. La variation de la température au cours d'une journée a une valeur courante de l'ordre de 50 °C et peut atteindre parfois 70 °C. La figure 2 présente l'évolution journalière des températures à la surface du sol, près de la surface du sol et dans l'air à Djebel Disa dans le Sud tunisien au cours d'une journée d'un mois de juin (Floret et Pontanier, 1982).

Les forts gradients thermiques sont à l'origine de l'altération superficielle des roches et des matériaux, qui provoque leur fragmentation et la désagrégation.

- **Les vents** sont souvent violents et permettent l'accélération de la désagrégation et le transport de ses produits. Ils provoquent ainsi « l'érosion », connue aussi sous l'appellation d'« érosion éolienne ». Le nombre de jours de vent de sable varie de 2 à 7 j/mois. Les vents les plus forts ont lieu au début du printemps (durant les mois de mars et avril). La période la plus calme se situe aux mois d'octobre et novembre. Les vents, selon leur vitesse, peuvent mettre en mouvement et transporter les sols. La figure 3 montre la vitesse de transport de certains matériaux en fonction du diamètre des particules. Les particules les plus sensibles au déplacement par le vent sont celles ayant un diamètre de 0,08 à 0,2 mm. Les particules les plus grosses sont lourdes et donc plus résistantes au mouvement et les plus fines présentent une certaine cohésion qui freine leur déplacement.

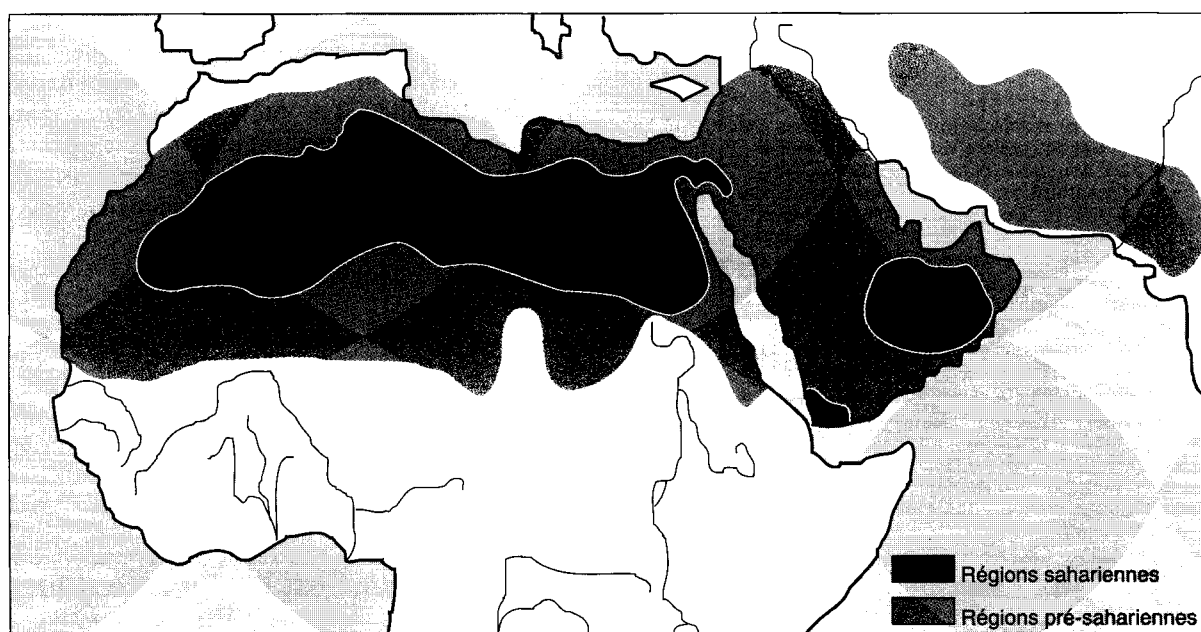


Fig. 1 - Extension du Sahara et des régions pré-sahariennes.

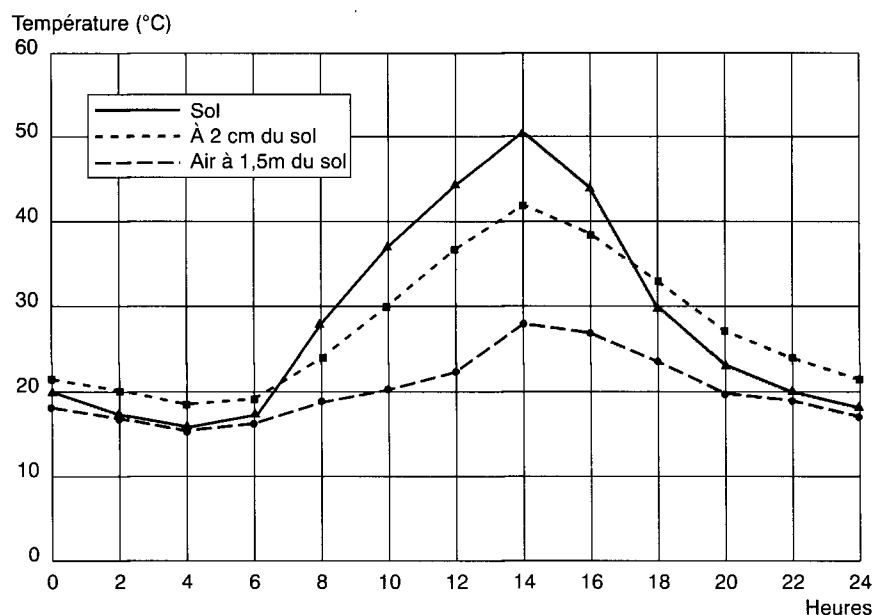


Fig. 2 - Variation de la température au cours d'une journée en milieu pré-saharien (Floret et Pontanier, 1982).

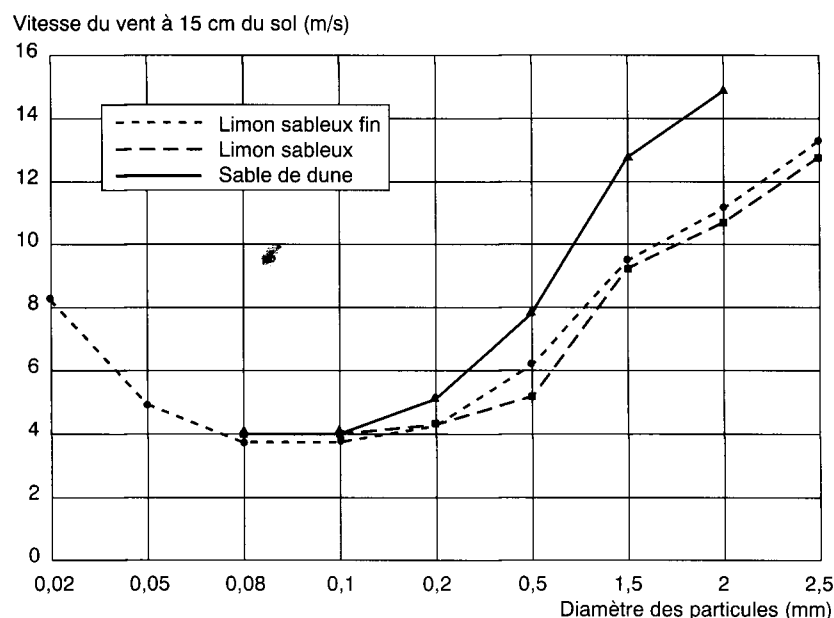


Fig. 3 - Vitesse du vent provoquant le transport des sols en fonction de la taille des particules (Chakroun, 1989).

- **La pluviosité** dans le Sahara est faible, voire nulle durant plusieurs années. Quand les précipitations ont lieu, elles sont violentes, courtes et orageuses. La moyenne annuelle des précipitations est inférieure à 50 mm, avec d'importantes variations. Les oueds et cours d'eau, quand ils existent, sont très larges et peu profonds. Les eaux sont rares et de qualité variable. Les eaux superficielles sont très peu fréquentes à cause des faibles précipitations. Elles se présentent parfois sous forme de sebkha ou chott, avec une salinité élevée le plus souvent.

- **Les eaux douces** doivent être recherchées dans les nappes profondes, à plus de 500 m sous le niveau du sol. Pour les nappes plus profondes,

que l'on rencontre vers 2 000 m et plus, les eaux sont chaudes et sortent à la surface du sol à des températures voisines de 70 °C.

Le sol saharien

La couverture des zones sahariennes est constituée dans sa quasi totalité de matériaux du quaternaire. L'éventail des matériaux n'est pas très large. On rencontre essentiellement des roches, des éboulis, des sables, des limons et des argiles.

- **Les roches** sont anciennes ou récentes et composées le plus souvent de calcaires massifs, de grès, de tufs calcaires, de tufs gypseux, etc. Elles constituent les montagnes et les hauts plateaux.

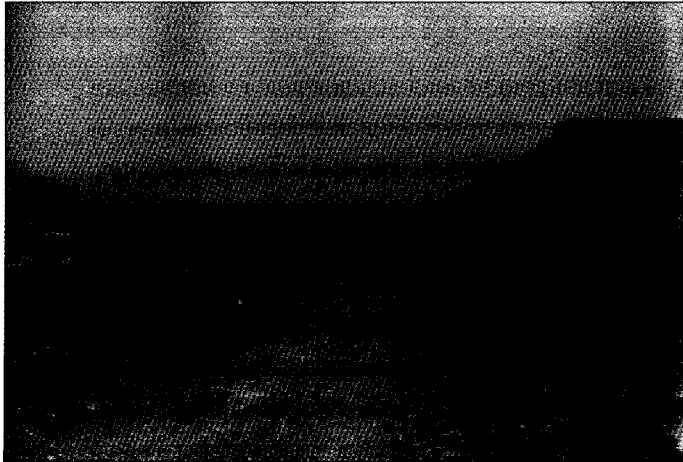


Fig. 4 - Montagne rocheuse au Sahara tunisien.

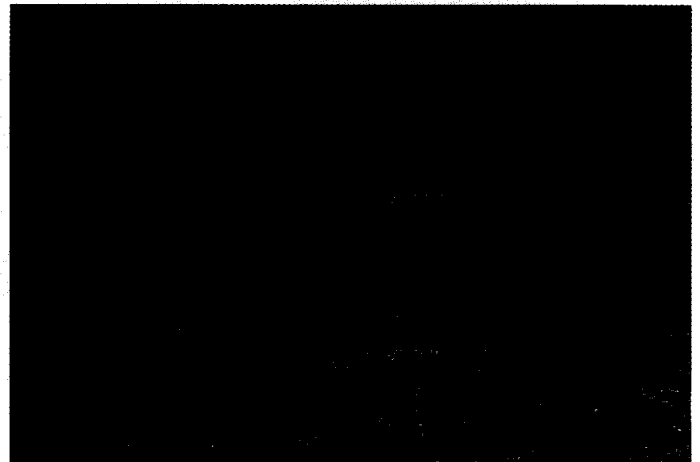


Fig. 7 - Dunes de sable.



Fig. 5 - Falaise et éboulis au Sahara.

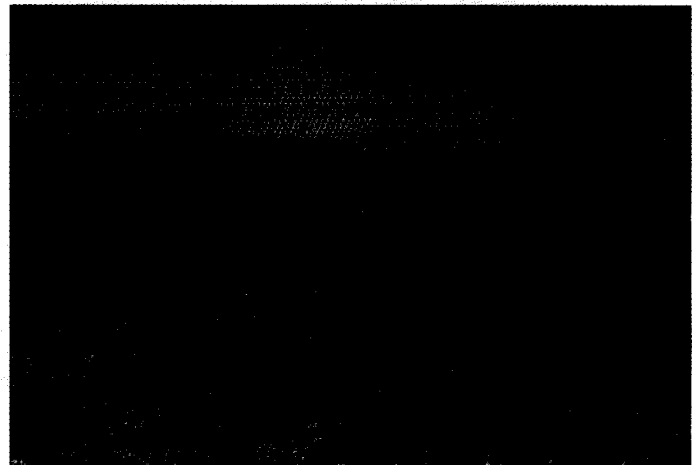
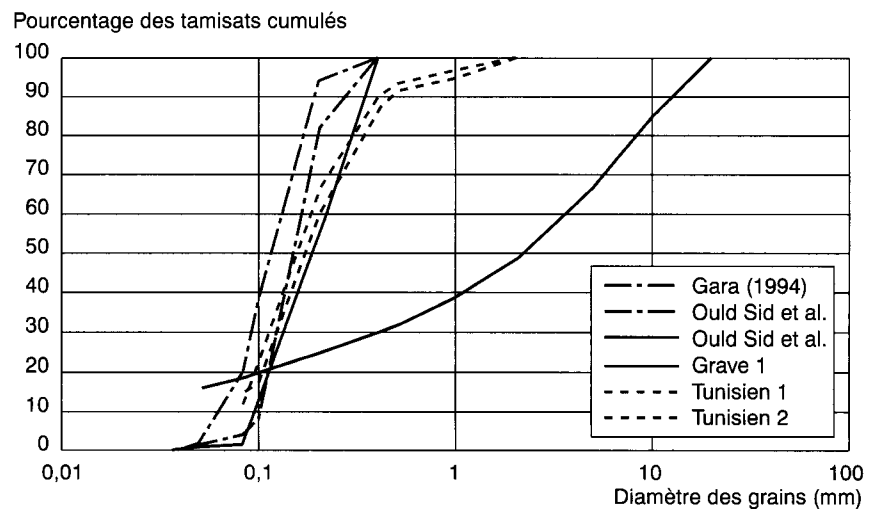


Fig. 8 - Vue d'un sebkha dans le sud tunisien. On voit en arrière-plan des dunes de sable d'une hauteur de l'ordre de 20 mètres.

Fig. 6 - Courbes granulométriques de sables de dunes de diverses régions du Sahara.



La figure 4 présente un exemple de montagne traversée par la piste de liaison de Borj Bourguiba au Sahara tunisien.

- **Les éboulis** sont les matériaux accumulés au pied des montagnes, dans les gorges et dans les oueds et formant les ergs. Ils sont constitués de fragments de roches ou de granulats de formes et de tailles variables. Leurs dimensions sont d'autant plus faibles qu'ils se trouvent éloignés des montagnes où ils ont pris naissance. La figure 5 présente un exemple d'éboulis et une falaise calcaire dans la région de Rémada à l'extrême Sud tunisien.

- **Les sables**, que l'on trouve dans les dunes mouvantes, sont composés de particules siliceuses pratiquement de même taille et de petites dimensions. La figure 6 présente les courbes granulométriques de sables de dunes de différentes origines comparées à celle d'une grave alluvionnaire provenant aussi du Sahara.

Ces sables sont accumulés sous forme de dunes mouvantes de hauteur très variable. La figure 7 montre un exemple de dunes de sable qui ne peuvent être franchies que par endroit et par des véhicules tout terrain.

- **Les limons** constituent, en alternance avec les loess, la couverture en couche mince la plus fréquente, dans les oueds.

- **Les argiles** sont rencontrées essentiellement dans les dépressions et constituent très souvent le support des marécages, des sebkhas et des chotts. La figure 8 présente une vue d'un sebkha dans le Sud tunisien.

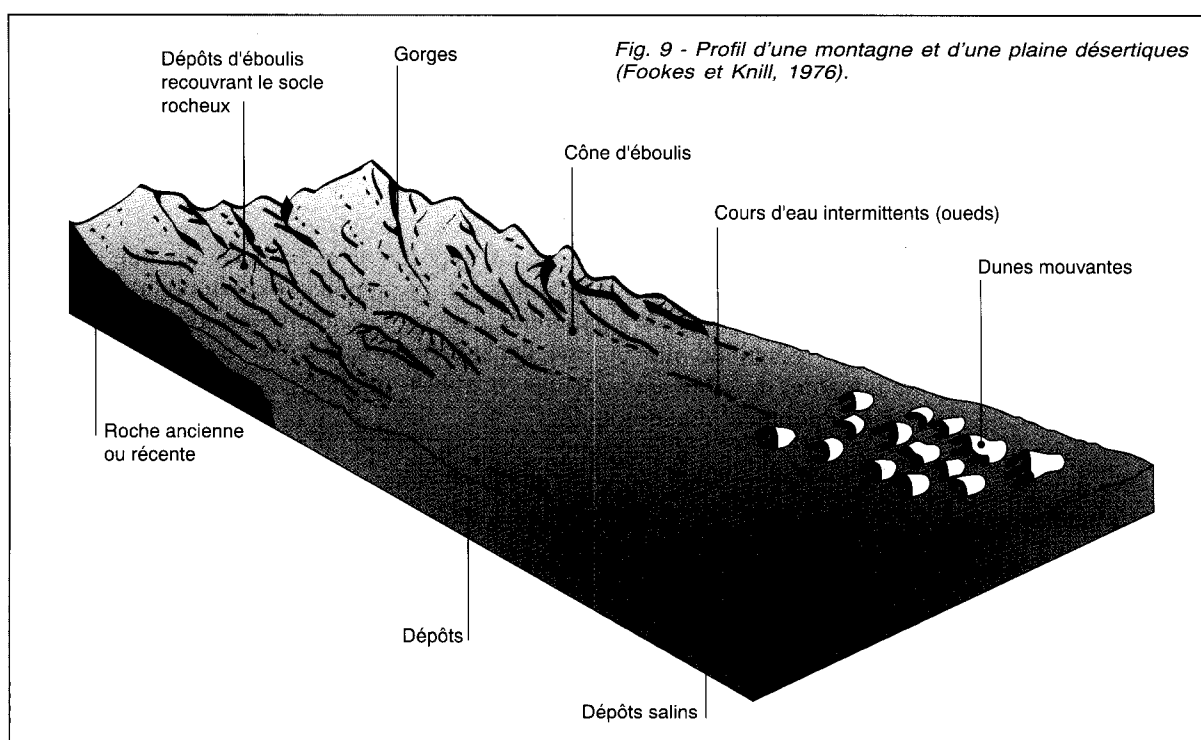
La figure 9 (Fookes et Knill, 1976) montre la position typique de ces sols et roches dans une montagne et une plaine désertiques.

D'après Fookes et Higginbotham (1968), le Sahara 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, etc. Le Sahara, quant à lui, couvre environ le tiers du continent africain (cf. fig. 1).

Ces chiffres montrent bien l'intérêt que l'on doit apporter à la construction routière dans le Sahara, qui reste fort démunie en infrastructures, et aussi l'importance que l'on doit accorder au sable dans toute investigation visant la valorisation des matériaux locaux dans ces lieux.

Utilisation du sable de dune

L'utilisation des sables en techniques routières n'est pas nouvelle. Beaucoup d'études et de réalisations ont été faites et un guide pratique d'utilisation routière des sables a été publié (Chauvin, 1987). Cependant, les sables de dunes constituent un cas particulier pour lequel les directives et recommandations ne peuvent pas être appliquées sans études spécifiques. L'utilisation du sable de dune seul ne peut être envisagée malgré la facilité qu'il présente au reprofilage, car sa stabilité de surface est souvent incertaine, ce qui augmente la résistance au roulement et provoque parfois des enlissements (Autret, 1989). Mais il pourrait être mélangé avec d'autres matériaux.



Identification des sables de dunes du Sahara

Composition chimique

Ce sont des sables dont la composition chimique est très simple : plus de 95 % de silice, de 1 à 2 % de calcaire et des traces de différents oxydes. Du fait de cette constitution, le sable a une couleur blanche légèrement jaune et ocre, il se des sèche et perd facilement sa cohésion en surface.

Granulométrie

Le diamètre des plus gros éléments des sables de dunes du Sahara est de l'ordre de 0,5 mm. Il est maximal aux endroits les plus proches de la roche mère et diminue de plus en plus quand on s'en éloigne. Les particules deviennent aussi de plus en plus arrondies. Le diamètre des éléments les plus fins est de l'ordre de 0,04 mm. Le coefficient d'uniformité ($C_U = D_{60}/D_{10}$) est de l'ordre de 1,8 et le coefficient de courbure ($C_C = D_{30}^2/[D_{10} \cdot D_{60}]$) est de l'ordre de 10. Il s'agit donc d'un sable très fin mal gradué. La figure 10 montre deux courbes granulométriques de sables de dunes prélevés dans deux zones sahariennes différentes en Tunisie (Gara, 1994) et en Mauritanie (Ould Sid et al., 1995).

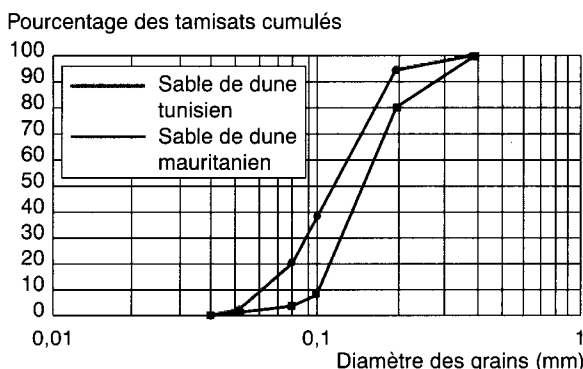


Fig. 10 - Courbes granulométriques de deux sables de dunes.

Propreté

Le sable de dune ne contient pratiquement pas de traces d'argile. Il a une limite de liquidité w_L de l'ordre de 25 et une limite de plasticité non mesurable. La valeur de l'équivalent de sable est supérieure à 60 %. La valeur de bleu est de l'ordre de 0,1.

Comportement mécanique

Des essais de compactage puis de cisaillement direct ont été réalisés par Ould Sid et al. (1995). Les principaux résultats trouvés sont que :

➤ l'effet de la teneur en eau sur le compactage est peu significatif quand la teneur en eau est faible (0 à 6 %) ;

➤ la cohésion a une valeur très faible, de l'ordre de 5 kPa ;

➤ l'angle de frottement interne varie de 30 à 35°, selon la densité du sable.

Les valeurs de ces paramètres montrent que le sable de dune peut avoir un bon comportement mécanique même lorsque sa compacité est faible, à condition d'être à l'abri du vent.

Par ailleurs, l'indice portant CBR de ces sables, au poids volumique et à la teneur en eau de l'optimum Proctor modifié, est relativement faible. Il est de l'ordre de 10 %. C'est ce qui permet, entre autres, d'écarter toute possibilité d'utilisation de ces sables seuls en corps de chaussée.

Les formules possibles

Compte tenu des matériaux disponibles dans les régions sahariennes, le sable pourrait être utilisé soit avec une grave, soit avec un tuf calcaire ou gypseux, soit avec un sol argileux. L'intérêt d'un tel mélange se situe à deux niveaux technique et économique.

• **Les aspects économiques** sont évidents dans la mesure où l'utilisation du sable de dune permet une économie certaine dans le transport des matériaux, puisqu'il est partout disponible en quantités inépuisables. Par ailleurs, son extraction n'engendre pratiquement pas de frais supplémentaires et son mélange avec les autres matériaux sur chantier peut se faire facilement.

• **Les intérêts techniques** sont de deux types :

➤ le sable peut contribuer à la densification des matériaux. Ceci permet, par la même occasion, l'amélioration de leurs caractéristiques géotechniques en augmentant le frottement interne et en améliorant la portance ;

➤ il peut être utilisé pour diminuer la plasticité des matériaux de base.

Mais quel dosage en sable de dune doit être adopté ?

On peut apporter à cette question une réponse théorique et une réponse expérimentale. Dans le premier cas, on considère que le mélange aura une densité maximale si sa courbe granulométrique vérifie la relation :

$$P = 100 (d/D)^n$$

où :

– P est le pourcentage du tamisat au diamètre d ;
– D, le diamètre des plus gros éléments du mélange.

La valeur du coefficient sans dimension n influe sur plusieurs paramètres :

– une valeur de n inférieure à 0,5 favorise la densité du matériau ;

- une valeur comprise entre 0,35 et 0,4 donne une facilité à la mise en œuvre ;
- la déflexion d'une couche de base en matériau graveleux est minimale pour n comprise entre 0,7 et 1,2 ; pour une couche de sable, elle est minimale pour $n = 6$.

Dans ce type d'approche, le sable intervient uniquement comme correcteur granulométrique. La fraction du mélange qui lui revient dépend à la fois de n et du diamètre des plus gros éléments D . Elle est d'autant plus importante que D est faible, sans toutefois dépasser la valeur de 10 %. En effet, pour la fraction des fines (0 à 0,08 mm), la granulométrie perd son importance et ce sont les effets physico-chimiques qui prédominent.

Dans l'approche expérimentale, on utilise différents matériaux disponibles au Sahara mélangés en proportions variables avec du sable de dune et on détermine les caractéristiques géotechniques des mélanges. Les critères de jugement des formules sont par ordre de priorité décroissante :

- une portance maximale,
- un poids volumique maximal,
- une plasticité minimale,
- une granulométrie continue et uniforme.

La situation de la courbe granulométrique du mélange par rapport aux fuseaux classiques nous semble sans grand intérêt pour ce sujet.

Les mélanges suivants ont été étudiés :

- les matériaux de base sont : une grave naturelle 0/20, un tuf calcaire, un tuf gypseux (Ben Dhia, 1983) et un sol argileux ayant des indices portants de l'ordre de 20 % ;
- le sable est mélangé avec chacun de ces matériaux aux pourcentages suivants 5, 15, 25 et 35 %.

Résultats expérimentaux

L'incorporation du sable de dune améliore d'une manière claire la portance des matériaux. Seule la portance de la grave alluvionnaire n'a pratiquement pas été modifiée. La figure 11 illustre ces résultats. Pour mettre en exergue l'effet de l'ajout de sable de dune, les matériaux de base ont été choisis avec des indices CBR immédiats comparables.

Le poids volumique s'améliore aussi ou reste quasi constant lorsque la teneur en sable du mélange augmente jusqu'à 30 %. Il décroît légèrement ensuite pour aboutir à la valeur relative au sable seul, comme le montre la figure 12.

Quant à la plasticité, elle diminue au profit d'une nette amélioration de la propreté, qui peut être caractérisée par l'essai d'équivalent de sable. La figure 13 montre l'évolution de la valeur de

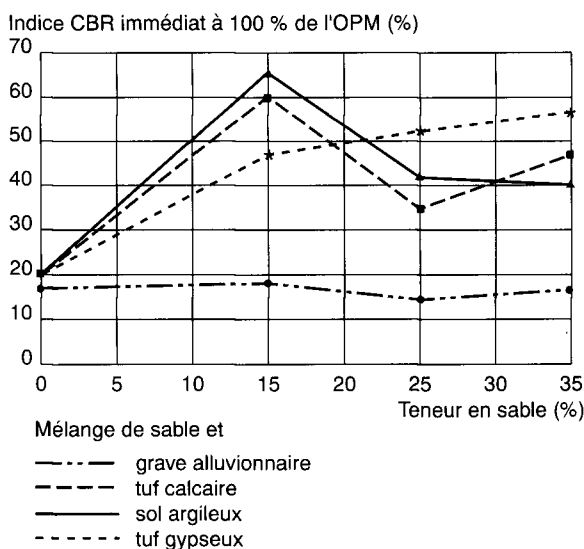


Fig. 11 - Effet de l'incorporation de sable de dune sur la portance de divers matériaux.

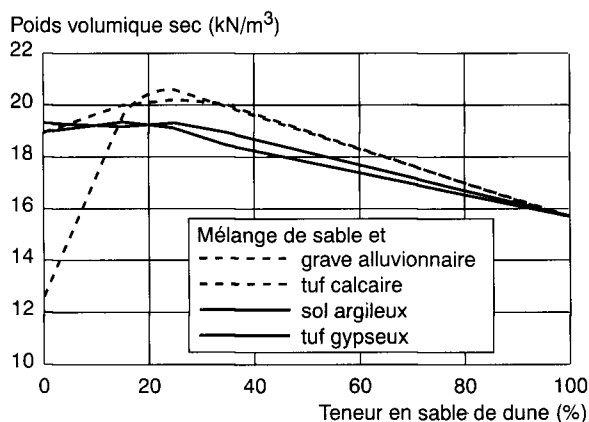


Fig. 12 - Effet de la teneur en sable de dune sur le poids volumique.

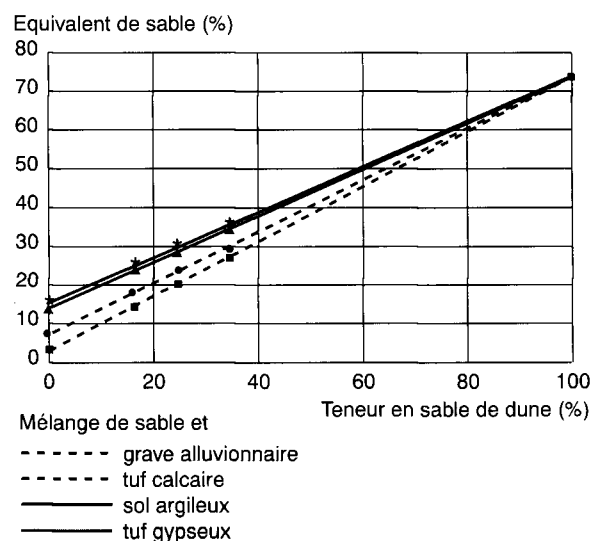


Fig. 13 - Effet de la teneur en sable de dune sur la valeur de l'équivalent de sable.

l'équivalent de sable en fonction de l'augmentation de la proportion du sable de dune dans les différents mélanges.

Pour la grave alluvionnaire qui a une cohésion de 50 kPa et un angle de frottement interne de 40 degrés, on enregistre une baisse de la cohésion quand le pourcentage de sable de dune augmente. La cohésion devient pratiquement nulle lorsque le mélange contient 30 % de sable, comme présenté sur la figure 14.

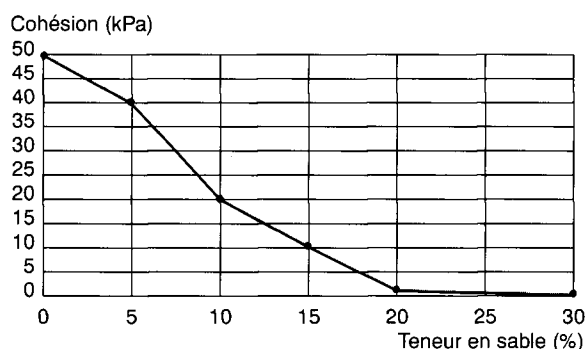


Fig. 14 - Effet de la teneur en sable de dune sur la cohésion d'un mélange à base d'une grave alluvionnaire et de sable (Ould Sid et al., 1995).

L'angle de frottement interne, quant à lui, reste pratiquement constant lorsque la proportion du sable de dune augmente, puis il diminue légèrement pour se stabiliser à la valeur relative au sable de dune seul (30 à 35 degrés).

Conclusion

Nous pouvons retenir de toutes ces études que jusqu'à 25 % environ d'ajout de sable de dune, le matériau obtenu a des caractéristiques géotechniques comparables à celles du matériau de base, sinon meilleures.

Effet de la salinité

Le problème de la salinité se pose à la route en milieu saharien sous deux aspects :

- lorsque la route passe sur un sol où la nappe est proche du niveau du terrain naturel, les remontées capillaires font migrer le sel jusqu'au corps de la chaussée. Quel est l'effet de cette remontée d'eau salée ?
- l'eau douce est rare au Sahara. Peut-on utiliser l'eau salée pour le compactage de la plate-forme et du corps de chaussée ?

Ces deux questions conduisent à étudier l'incidence de la présence du sel sur les caractéristiques géotechniques des matériaux.

Méthodologie de l'étude

Les paramètres géotechniques à considérer sont :

- pour les sols :
 - le poids volumique et la teneur en eau de l'optimum Proctor modifié,
 - la portance CBR,
- pour les granulats :
 - la résistance aux chocs, caractérisée par l'essai Los Angeles (LA),
 - la résistance à l'usure, caractérisée par les essais Micro-Deval à sec (MDS) et en présence d'eau (MDE).

Dans le cas des essais sur les sols, le sel est introduit progressivement dans l'eau de compactage. On étudie ensuite l'effet de la teneur en sel dans l'eau sur les caractéristiques géotechniques. L'eau de mer, qui peut être considérée comme référence, a une teneur en sel de 35 g/l. Nous avons testé des teneurs en sel de 0 à 50 grammes par litre.

En ce qui concerne les granulats, la variation de la teneur en sel est obtenue avec des cycles d'immersion et séchage dans l'eau salée.

Les résultats des essais réalisés sur un sable, un tuf (roche tendre à prédominance calcaire ou calcaire et gypse ; Ben Dhia, 1983) et une grave sahariens différents de ceux utilisés dans la partie précédente sont présentés dans ce qui suit.

Résultats expérimentaux

Le poids volumique optimal obtenu par l'essai Proctor modifié est peu affecté par la présence du sel (fig. 15).

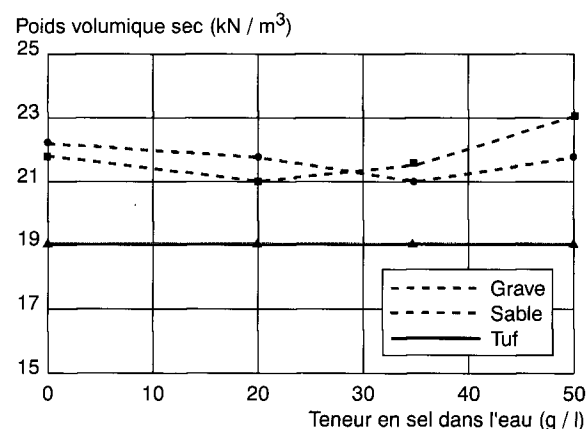


Fig. 15 - Effet de la teneur en sel sur le poids volumique optimal de l'essai Proctor modifié.

La teneur en eau de l'optimum Proctor modifié n'est pratiquement pas modifiée par la présence du sel dans l'eau de compactage, comme le montre la figure 16.

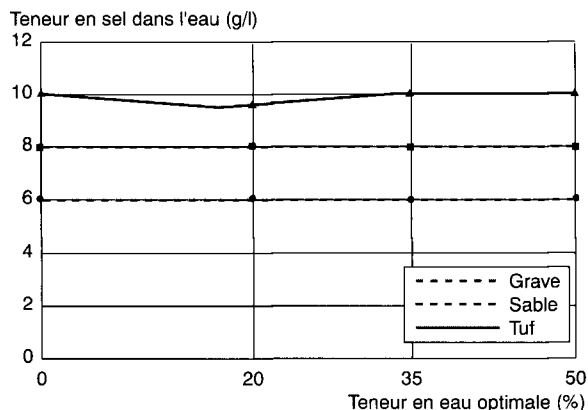
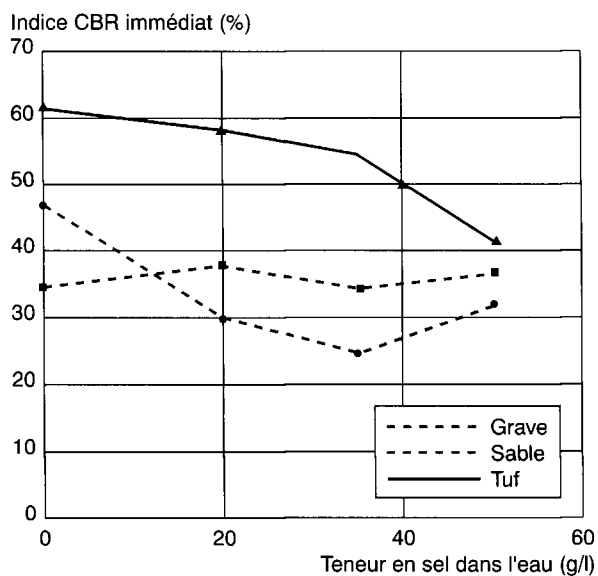
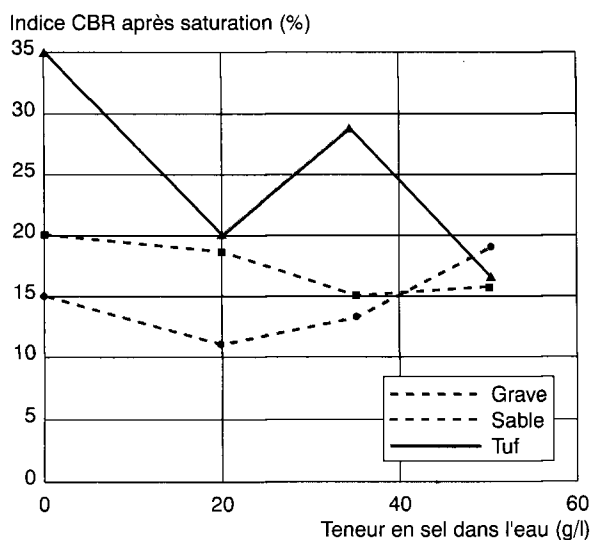


Fig. 16 - Effet de la teneur en sel sur la teneur en eau à l'optimum Proctor modifié.



a - sur la portance immédiate.



b - sur la portance après saturation.

Fig. 17 - Effet de la salinité.

La portance diminue lorsque la salinité augmente. L'indice portant immédiat est plus sensible à la variation de la salinité que l'indice portant après saturation pendant quatre jours dans une eau de salinité égale à celle de l'eau de compactage. Les figures 17a et 17b présentent la variation de l'indice CBR en fonction de la teneur en sel dans l'eau de compactage.

Pour les granulats dont la teneur en sel augmente par des cycles d'immersion-séchage dans l'eau salée, les caractéristiques géotechniques s'améliorent, ce qui est en accord avec la formation de croûtes dures par la remontée du sel décrite par Alderson et Mectaf (1991). Il y a une amélioration des résistances aux chocs et à l'usure, reflétée par une diminution des coefficients Los Angeles et Micro-Deval (fig. 18 et 19).

D'après ces résultats, l'eau salée à une teneur en sel proche de celle de l'eau de mer peut être utilisée pour le compactage du sol de la plate-forme et du corps de la chaussée sans effet néfaste sur les matériaux. Il en est de même pour le cas du sel provenant d'une éventuelle nappe superficielle.

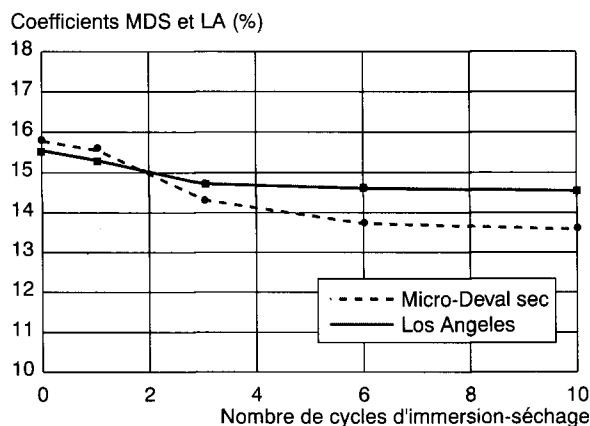


Fig. 18 - Effet de la salinité sur les coefficients Los Angeles et Micro-Deval sec.

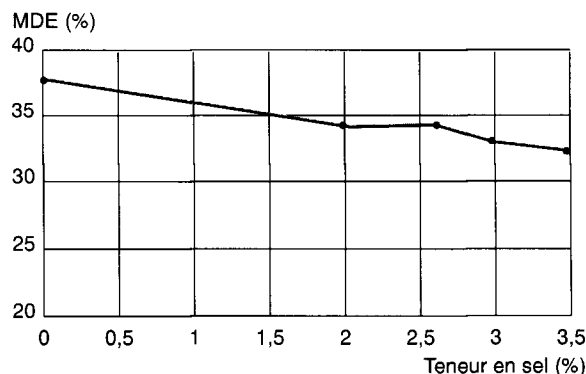


Fig. 19 - Effet de la salinité sur le coefficient Micro-Deval en présence d'eau.

Conclusions

Cette étude, utilisant des données bibliographiques et les résultats d'essais de laboratoire, a permis de présenter le contexte saharien avec ses caractéristiques climatiques et ses matériaux de construction. Dans ces régions, comme partout ailleurs, il y a un grand intérêt à minimiser autant que possible le transport des matériaux et de l'eau. L'incorporation du sable de dune dans les matériaux routiers et l'utilisation de l'eau salée (ou de mer) dans les opérations de compactage sont des solutions convenables pour atteindre cet objectif car les résultats trouvés lors de cette étude sont encourageants. Leur application dans des chantiers réels présente des avantages économiques certains. Cependant, des études relatives à l'effet de la salinité sur les revêtements méritent d'être effectuées.

— RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES —

- AFIRI A., BELKZIZ A., BEN ALLA M., *Routes en milieu désertique. L'expérience marocaine*, Direction des routes et de la circulation routière du Maroc, pp. 6-38.
- ALDERSON A., MECTAF J.B. (1991), *Routes dans les régions désertiques*, AIPCR.
- AUTRET P. (1989), *Routes dans les régions en développement*, LCPC, 64 pages.
- BEN DHIA M.H. (1983), *Les tufs et encroûtements calcaires dans la construction routière*, Thèse de l'Université de Paris VI, 189 pages.
- CHAKROUN M.L. (1989), *La protection des routes contre l'ensablement*, Ministère de l'agriculture de Tunisie, 7 pages.
- CHAUVIN J.-J. (1987), *Les sables*, Guide pratique d'utilisation routière, ISTED.
- FLORET C., PONTANIER R. (1982), *L'aridité en Tunisie présaharienne ; climat, sol, végétation et aménagement*, ORSTOM, Paris, 405 pages.
- FOOKES P.G. (1976), Road geotechnics in hot desert, *Jnl Inst. Highway Engs*, **11-22**.
- FOOKES P.G., HIGGINBOTHAM I.E. (1968), *Some problems of 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.
- GARA S. (1994), *Effet de la teneur en fines sur le comportement des graves non traitées : application au sable du désert*, DEA - ENIT, Tunisie, 75 pages.
- OULD SID A.C., HAVARD H., VALIN C. (1995), Terrassements routiers dans les sables de dunes de Mauritanie, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **199**, sept.-oct., pp. 27-34.

ABSTRACT

Some specific aspects of the use of dune sand in the Sahara

M. BEN DHIA

This paper presents some specific aspects of road construction in the Sahara. Special attention is given to the climate, Saharan soils, local construction materials and some problems imposed by this environment. A laboratory study is described which examines the incorporation of desert sand into road materials and analyses the effect of salinity on the behaviour of these materials and their compacted. The results of the geotechnical tests which are presented lead to the conclusion that desert sand can be used in road materials up to a maximum percentage of about 25% and that the salinity originating from compaction water or ground water does not noticeably affect the geotechnical characteristics of materials in pavement base and subgrade courses. The effect of salinity on the surfacing is still to be investigated.