

SIMULATION EXPÉRIMENTALE D'UN COMPOSÉ GÉOCELLULE / SABLE DE DUNES EN SUBSTITUTION D'UN TUF EN CORPS DE CHAUSSEE

EXPERIMENTAL SIMULATION OF GEOCELL / DUNE SAND COMPOUND IN SUBSTITUTION OF TUFF FOR ROADWAYS

Mustapha KEBAILI¹, Said TABTI², Yousra Widad MERIEM¹, Halima HAMANA¹, Naima KOUININI¹

1 AFITEX-ALGERIE, Alger & Université KASDI Merbah, Ouargla, Algérie

2 AFITEX-ALGERIE, Alger, Algérie

RÉSUMÉ- Le tuf compacté, malgré ses défauts mécaniques, est largement utilisé en corps de chaussées dans les régions Sud de l'Algérie. Cette utilisation est imposée par cause d'absence de matériaux nobles et normalisés. L'étude élaborée vise à évaluer la convenance de substitution d'un tuf compacté par un composé: géocellule / sable de dunes ; destiné à compenser le défaut de cohésion du sable de dunes. A la différence de mise en œuvre, habituellement en position inclinée, dans la présente investigation, la géocellule est posée horizontalement dans le corps de route. Les résultats obtenus dans les essais au laboratoire et sur site attestent de la convenance du procédé.

Mots-clés: Géocellule; Sable de dunes; Route; CBR; Essai de plaque

ABSTRACT – Compacted tuff, despite its mechanical defects, is widely used in the southern regions of Algeria as material composing pavements. This use is imposed due to the absence of noble and standardized materials. The study carried-out is to assess the feasibility of substituting compacted tuff by a geocell / dune sand compound, so as to compensate the cohesion default of the sand. Distinctly to usual inclined position, in the present investigation, the geocell is set-up horizontally along the roadway. The experimental plan involves set of laboratory and in-situ tests. The investigation results attest of acceptable convenience of the geocell/dune sand compound as pavement structure material.

Keywords: Geocell, dune sands, roadway, CBR, plate test.

1. Introduction

L'idée de base régissant l'étude élaborée est la substitution, même partielle, du matériau tuf par un composé géocellule / sable de dunes (GCE/SDD). Le tuf est réputé dans le sud de l'Algérie pour être utilisable en corps de route. Ce, pour réalisation de tout type de couche: de forme, de fondation et/ou de base. Cette large utilisation est dictée par la contrainte de rareté de matériaux dits nobles à utiliser pour réaliser les routes de tous les types. En termes de géotechnique routière, les matériaux considérés 'nobles' sont ceux présentant un frottement prononcé tels que les graviers grossiers, la grave, les tout-venants d'oueds (TVO) et les cailloux (Baslimane, 1994 ; Morsli et al., 2001). Mises à part quelques régions peu nombreuses et peu peuplées des Hammadas, ces types de matériaux sont, malheureusement, peu à non disponibles. La plupart de la superficie du Sud Algérien et du Sahara septentrional est de composition superficielle détritique et amorphe (Daoud, 2005). Le développement des réseaux routiers est désavantagé par ce fait. Dans la plupart des cas, les techniques routières tendent à rationaliser les matériaux dits locaux pour contourner ce déficit. Selon Boulal, (2013), les matériaux peu frictionnels, mais assez visiblement cohésifs peuvent être utilisés en remplacement des matériaux nobles reconnus rares. Des dispositions de conception et de mise en œuvre des ouvrages routiers sont proposées par plusieurs auteurs (Baslimane, 1994 ; Touati-Tliba, 1994 ; Ichtioui et al., 1994 ; Kalli, 1994 ; Ayadi, 2005;). Cependant, l'ensemble des auteurs en relation avec ce sujet déclarent le défaut de compensation de portance offerte par les matériaux (plutôt) cohésifs comparativement à celle développée par les matériaux frictionnels.

D'une autre part, la durée de vie des chaussées réalisées, sur la base des matériaux existants, est visiblement courte, compte tenu des conditions climatiques et de service appliquées, et cela malgré les consignes et recommandations des services techniques (Haouchine, 1994 ; Kherfi, 2001) et avis des connaisseurs en la matière. Selon les constatations établies par les services des directions des travaux publics de plusieurs Départements du Sud Algérien, une moyenne de 4 à 5 années est la période pour laquelle une chaussée du type route nationale (RN) est évaluée (et considérée) exploitable. Au-delà de cette durée, l'état de la route devient dégradé au point de nécessité de reconstruire entièrement la route.

Les pathologies les plus recensées se manifestent sous forme de fissures longitudinales et transversales, de crevasses singulières réparties sur toute l'étendue de la couche de roulement et de dégradation d'altération des accotements. La fig.1 montre un exemple de dégradation de la couche de roulement sur la RN 56 entre Ouargla et Touggourt.



Figure 1. Exemple de dégradations sur la RN 56.

Les principales causes des pathologies observées sont reconnues d'origines externes comme signalé. Cependant, la faible consistance et portance des couches sous-jacentes à la couche de roulement peuvent (tout aussi bien) favoriser et contribuer à la dégradation de cette dernière. La consistance indiquée est insinuée en termes de densité/compacité et rigidité structurelle.

En l'absence de matériaux adéquats et/ou de techniques de conception compatibles avec les conditions géotechniques régnantes, l'alternative d'utilisation d'un matériau à 'faible charges de mise en œuvre' est hautement sollicitée. La convenance du matériau en question et l'évaluation de sa mise en œuvre et maintenance sont à vérifier pour prétendre à une éventuelle utilisation de celui-ci. La section 2 (ci-dessous) dévoile quelques-uns des aspects techniques d'une telle substitution.

2. Composition du Matériau de Substitution

2.1. Approche technique

L'approche de substitution des matériaux traditionnels utilisés en corps des chaussées consiste en la mise en œuvre du sable des dunes (SDD) disponible, en abondance, dans presque toutes les régions où les réseaux routiers sont sollicités. L'avantage d'utilisation d'un tel matériau réside en son coût d'acquisition quasi-nul. A un défaut intrinsèque près, ce matériau est très ambitionné d'être utilisé pour mise en œuvre des chaussées. Le défaut de cohésion est reconnu l'inconvénient majeur du SDD pour être à hauteur des qualités requises pour réaliser une chaussée. Le diamètre, presque le même, des grains de ce sable pulvérulent induit un comportement mécanique tel que ce matériau s'effrite lorsqu'il est à ciel ouvert et sous l'action d'un chargement verticale.

Mais par ailleurs, existe le produit géocellulaire pouvant si bien être incorporé au SDD et lui conférer un confinement latéral. La géocellule (GCE) en soi ne peut reprendre des charges appliquées perpendiculairement à son plan. Cependant, la résistance au pelage des cellules (voire section 2.2) est à même de compenser l'équivalent latéral des charges routières ordinaires appliquées verticalement sur un matériau inclus dans ces cellules. La fig.2 montre la configuration structurelle du composé GCE/SDD envisagée pour exploiter et bénéficier des avantages rhéologiques simultanément des deux matériaux: le SDD reprendrait la charge routière appliquée et la GCE confère au sable le confinement latéral requis à l'encontre d'un échappement radial.



Figure 2. Approche de composition GCE/SDD.

2.2. Caractéristiques des matériaux utilisés

Les caractéristiques physiques et mécaniques des deux matériaux concernés pour mise en œuvre en corps de chaussée sont rapportées dans le tab.1. Le SDD est celui disponible dans la région d'Ouargla dans le Sud-Est de l'Algérie. D'un point de vue mécanique, les SDD rencontrés dans toute la région du Sud-Est de l'Algérie diffèrent peu les uns des autres. L'objectif de l'étude est de vérifier la convenance d'un SDD, pour réaliser une route, qui soit disponible dans un proche voisinage de celle-ci. Ce, pour bénéficier de l'économie d'approvisionnement et de mise en œuvre de ce matériau. Le procédé pourra être généralisé pour d'autres sites, selon le cas.

Tableau 1. Caractéristiques des matériaux: GCE et SDD.

Géocellule dénommée Alvéoter (GCA)	Sable de dunes
Propriétés physiques	Identification
Hauteur des alvéoles: 0,20 m	Poids volumique sec: 14.6 kN/m ³
Petit/grand côté des alvéoles: 0,20 m / 0.25m	Teneur en eau naturelle et des essais: nulle
Epaisseur des bandes: 2,2 mm	Equivalent de sable: 81.94 %
Géotextile non-tissé, aiguilleté, 100 % en polyester	Insolubles: 96 %
Masse surfacique du panneau: 600 g/m ²	Granulométrie
Propriétés mécaniques (NF EN ISO 10319)	d ₁₀ : 0.1mm
Résistance à la traction SP: 15 kN/m	d ₂₀ : 0.15mm
Allongement à la rupture: ≥ 32%	d ₅₀ : 0.25mm
Résistance au cisaillement des liaisons: 9 kN/m	d ₉₀ : 0.45mm
Résistance au pelage des liaisons: 9 kN/m	d ₁₀₀ : 1mm
Conditionnement	Résistance au cisaillement
Longueur / Largeur: 14.5m / 6,94 m	Cohésion: nulle
Poids du panneau: 60 kg	Angle de frottement interne: 29°

2.3. Programme d'investigation expérimentale

Le plan d'essais à réaliser en vue d'atteindre l'objectif visé par la présente étude comporte une investigation expérimentale au laboratoire et une campagne d'essais sur une petite planche d'essai réalisée sur site :

- L'investigation au laboratoire consiste en la recherche d'un équivalent en composé GCE/SDD qui puisse être à la même portance qu'un tuf habituellement utilisé dans la région d'Ouargla. La portance du matériau est considérée en termes de l'indice portant Californien mesuré sur le tuf de référence et sur le composé GCE/SDD.
- Les essais à établir sur site sont de trois types: l'essai Clegg, l'essai de plaque et celui de mesure de la densité du sol sur place. Ces types d'essais sont procédés sur la planche d'essai réalisée et sur la partie ordinaire de la route objet d'expérimentation. C'est-à-dire sur la partie de la route à l'extérieur de la planche d'essai.

3. Expérimentation de Laboratoire

3.1. Protocole expérimental

Le principal essai de laboratoire permettant d'évaluer la portance du composé GCE/SDD, en comparaison avec celle du tuf référence, est celui CBR. Pour ce faire, des analyses granulométriques, des essais Proctor Modifiés et des essais CBR immédiats sont opérés sur le Tuf référence, puis d'autres essais de même démarche que le CBR mais sur le composé GCE/SDD. La confection du composé GCE/SDD éprouvé au laboratoire est réalisée comme montrée sur la fig.3. Le diamètre du cylindre géocellulaire est fait varié jusqu'à atteindre une valeur de l'indice CBR comparable à celle du tuf seul. La désignation CBR de l'essai réalisé sur le composé GCE/SDD est modifiée comme CBR du fait que la composition du matériau testé ne répond pas aux indications de la norme NF P 94-078 de l'essai CBR proprement dit.



Figure 3. SDD incluant une cellule cylindrique en géotextile.

3.2. Résultats et interprétation

Le tableau 2 et la figure 4 résument les principaux résultats des essais de laboratoire réalisés sur le tuf référence. Le tableau 3 et la figure 5 présentent les résultats des essais CBR réalisés sur le composé GCE/SDD. Le CBR indiqué parmi les résultats des essais effectués sur GCE/SDD correspond au même protocole expérimental que celui du CBR normalisé (NF P 94-078). La figure 6 montre la variation de l'indice CBR en fonction du diamètre du cylindre confectionné par le même géotextile (GTX) que la géocellule (GVA).

Tableau 2. Résultats moyens des essais de laboratoire réalisés sur le tuf référence.

Caractéristiques physiques	Caractéristiques chimiques sommaires			
Masse Volumique naturelle: 1,53 g/cm ³	Insolubles: 28 %, SO ₄ ²⁻ : 62.5 %, CaCO ₃ : 3 %			
Masse Volumique maximale: 1,71 g/cm ³	Caractéristiques mécaniques			
Masse Volumique minimale: 1,36 g/cm ³	Proctor Modifié: $\gamma_d^{\max} = 1.89 \text{ g/cm}^3$, $\omega_{\text{opt}} = 6.5\%$			
Granulométrie: voir figure 1	Indice CBR: 55 % (valeur minimale obtenue)			
L _L : 18.5 %	R _C (bar)	95% _{OPM}	98% _{OPM}	100% _{OPM}
L _p : Impossible		0.13	0.15	0.17

Tableau 3. Résultats des essais CBR réalisés sur le composé GCE/SDD.

$\Phi(\text{cm})$	0	3	5	7	9	11	13
<u>CBR</u> (%)	Impossible	10.13	25.61	41.71	20.92	15.51	3.34

Le tableau 3 montre que les résultats des essais CBR réalisés sur le composé GCE/SDD sont tous inférieurs à celui du CBR du tuf référence. La meilleure valeur atteinte du CBR est 41.71%. Elle correspond à 75% de celle du tuf. Par ailleurs, la figure 6 montre que ce meilleur résultat correspond à un diamètre $\phi = 7\text{cm}$ du cylindre confectionné en GTX pour servir aux essais CBR.

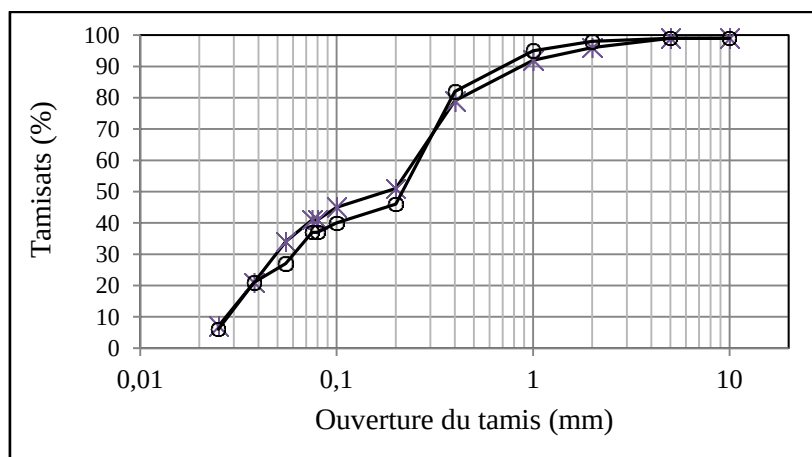


Figure 4: Résultats d'analyses granulométriques sur le tuf.

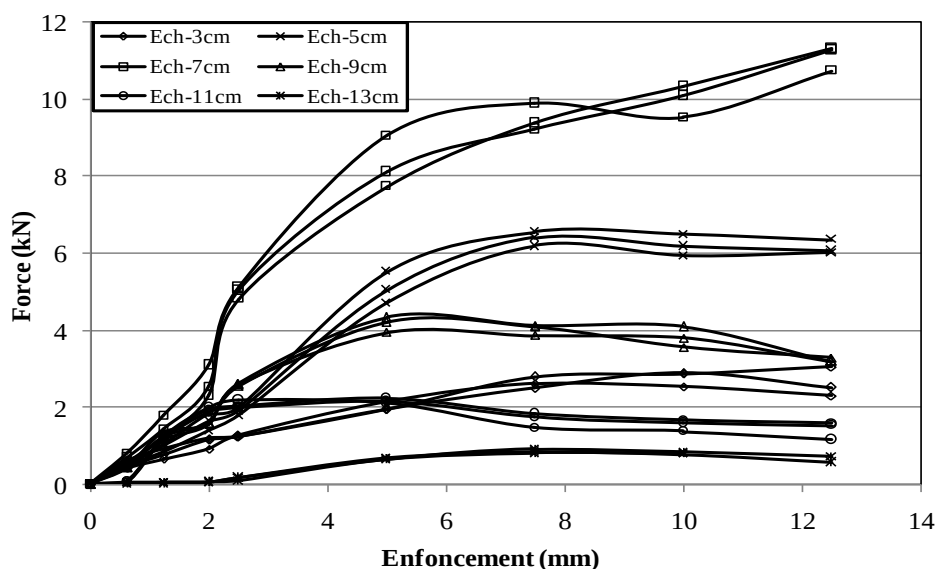


Figure 5. Forces enregistrées durant les essais CBR réalisés sur GCE/SDD.

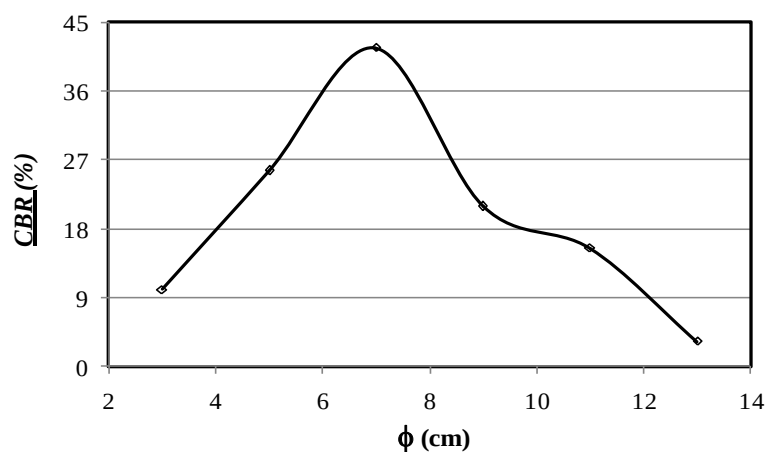


Figure 6: Variation de l'indice CBR en fonction du diamètre des cylindres GTX.

En vertu des résultats exprimés au titre du tableau 3 et de la figure 6, les déductions ci-dessous sont retenues:

- L'indice CBR = 41,7% représente la valeur maximale de la portance exprimée au titre de l'essai réalisé. Selon Allard et Kienert (1981), cette valeur de l'indice de portance est acceptable pour la conception d'un corps de chaussée. Le dimensionnement de cette dernière doit être établi en conséquence.

- Le diamètre $\phi = 7\text{cm}$, correspondant à la valeur optimale du CBR en question, est (entre autres) fonction du diamètre du piston utilisé dans l'essai au poinçonnement CBR ($D=5\text{cm}$). Un autre diamètre optimum aurait été obtenu si la charge normale appliquée était au biais d'un piston d'un autre diamètre. On estime que, pour des conditions de chargement comparables sur site, le même rapport ($\phi/D = 1.4$ du diamètre du cylindre confectionné en GTX sur celui du piston) peut être considéré. Pour une charge de véhicule lourd répartie sur une largeur de 20cm (par exemple), le diamètre intérieur de la GCE pour laquelle prévaut la valeur 42% du CBR est $\Phi = 20 \times 1.4 = 28\text{cm}$.

En tenant compte que la forme de la géocellule (GCA) est hexagonale, le diamètre 28cm doit représenter la distance moyenne entre deux sommets opposés et deux arrêts opposés. Cette simulation correspond à un petit diamètre de l'hexagone (tel que défini dans le tab.1) égal à 26cm, et un grand diamètre égal à 30cm. Ce sont, par ailleurs, des dimensions de l'unité hexagonale du matériau géocellulaire pouvant être fabriquée sans peine (Khelifi et Hadbi, 2016).

3.3. Conclusion

L'épreuve expérimentale du composé GCE/SDD au biais de l'essai CBR (en simulation du CBR normalisé) montre que le diamètre optimum d'un cylindre en GTX introduit dans le SDD, permettant d'obtenir un maximum de portance, est $\phi = 7\text{cm}$. Ce résultat est projeté sur site, au biais d'une simple amplification géométrique, pour être conçu comme une géocellule de grand diamètre 30cm. Ce, à titre indicatif, mais pouvant être retenu pour base d'une conception conséquente de la couche de route correspondante. Une expérimentation en vraie grandeur est, cependant nécessaire pour confirmer cette présomption.

4. Expérimentation sur site

4.1. Protocole expérimental

Une seconde phase de l'étude porte sur un autre type d'essai pouvant évaluer la capacité du composé GCE/SDD à substituer la couche de fondation d'une route en voie de réalisation. C'est une approche pragmatique en guise d'épreuve de la substitution envisagée. Cette dernière consiste en la réalisation de toute la couche de fondation par le procédé illustré sur la figure 2.

Les essais prévus sont ceux mentionnés dans la section 2.3. La couche de base a été réalisée sitôt après mise en œuvre de la couche de fondation en procédé GCE/SDD. L'indisponibilité des moyens expérimentaux en temps opportun a empêché de procéder aux essais de plaque directement sur la couche innovée. L'étude fut modifiée pour évaluer la réaction de la couche de base (reposant sur la couche en GCE/SDD) aux chargements à la plaque et aux percussions appliquées au titre de l'essai Clegg. La figure 7 montre une phase de mise en œuvre de la planche d'essai comportant la géocellule GCA.



Figure 7. Mise en œuvre de la planche d'essai.

4.2. Résultats et interprétation

Les résultats des essais effectivement réalisés sur la couche de base surmontant celle en GCE/SDD sont portés sur le tab.4. Ces derniers peuvent renseigner sur la convenance et l'efficacité de la couche de fondation réalisée en GCE/SDD, car en effet le jugement prévu est porté sur l'ensemble chaussée, non seulement sur la couche substituée. A noter que les épaisseurs des couches de fondation et de base sont dimensionnées pour 20cm chacune pour la route en question. Les mêmes dimensions sont retenues pour la planche d'essai. Ceci coïncide fort heureusement avec l'épaisseur de la GCE utilisée.

Par ailleurs, les résultats de mesure des densités (sur place) de la couche de base en tuf compacté surmontant le composé GCE/SDD sont comparables à ceux de la couche de base à l'extérieur de la planche d'essai. Ces résultats sont assez proches d'une moyenne de 1.87.

Tableau 4: Résultats représentatifs des essais réalisés sur site.

	Essais de plaque									Essais Clegg	
	Ev ₁ (MPa)			Ev ₂ (MPa)			Ev ₂ /Ev ₁			Moyenne des tests	CBR _{déd} (%)
Planche d'essai	94.05	89.57	92.08	195	184	181.5	2.07	2.05	1.97	32	71.68
Zone ordinaire (voir section 2.3)	147.5			235.6			1.6			35	85.75

Les résultats exprimés au titre du tableau 4 montrent, entre autres, les aspects suivants:

- Les résultats des essais Clegg, traduits par corrélation en résultats d'essai CBR, indiquent des réponses assez comparables à celles obtenues sur la partie ordinaire de la chaussée réalisée. Le rapport entre les deux valeurs est $\frac{CBR_{planche}}{CBR_{zone ordinaire}} = 84\%$. Ceci peut être dû à la portée assez limitée de la percussion au biais de l'Essai Clegg comparativement à l'épaisseur de la couche de base sur laquelle l'essai est procédé.
- Les résultats des essais de plaque, malgré peu nombreux compte tenu de la faible étendue de la planche d'essai, montrent des réactions au second cycle de chargement à hauteur de 80% comparées à celles enregistrées sur la partie ordinaire de la chaussée. Le diamètre de la plaque d'essai étant 60cm, la portée du bulbe des contraintes engendrées par les essais atteint (fort bien) et dépasse la couche en GCE/SDD. En effet, les contraintes issues d'une charge appliquée sur une surface de largeur B se diffusent dans la masse de sol d'épaisseur B à 1.5B en-dessous de la charge (Philipponnat et Hubert, 1997). Les rapports E_{v2}/E_{v1} sont, respectivement, aux frontières de l'intervalle d'un compactage acceptable (Norme NF P 94-117-1, 2000). Ceci constitue une preuve que la couche GCE/SDD constitue un bon support permettant le compactage de la couche sus/jacente; c.à.d. la couche de base confectionnée en tuf.

4.3. Conclusion

A l'issue des résultats obtenus, notamment des essais de plaque réalisés respectivement sur les deux parties de la chaussée (ordinaire et en GCE/SDD), le procédé innové est jugé acceptable. Cette appréciation est basée sur le fait que les réponses obtenues sont visiblement proches les unes des autres. Les matériaux utilisés pour la mise en œuvre des parties ordinaires de la route ne constituent nullement une référence de capacité portante des couches de chaussées. Autrement dit, les résultats obtenus sur le tronçon de route incluant la GCE/SDD en couche de fondation pouvaient être comparés à ceux d'autres ouvrages routiers; réalisé en d'autres matériaux locaux. Bien des ouvrages routiers sont approuvés par les autorités techniques et les bureaux d'études pour des résultats en CBR atteignant des seuils de 25% (Hafsi, 2004).

5. Conclusion

En vertu de l'investigation expérimentale menée au titre de la présente étude, quelques sujets remarquables sont soulignés. L'étude en soi ouvre accès à un champ d'investigation assez large, de par l'originalité de l'approche adoptée.

La problématique traitée est celle de la rareté des matériaux de construction des corps de routes dans le Sud de l'Algérie et dans les pays du Sahel. L'objectif visé en est la contribution à l'évaluation de

la convenance de substitution des matériaux conventionnellement utilisés en corps de chaussée par un composé en GCE et sable de dunes. Le stimulant de cette approche est la disponibilité abondante de ces deux matériaux, ainsi que la facilité de mise en œuvre.

L'investigation au laboratoire de la contribution de la GCE au confinement latéral du SDD confirme ce préjugé. La notion de 'cohésion à échelle macroscopique' est un concept requérant des études assez ciblées visant à quantifier la réduction de l'effritement d'un SDD stabilisé par GCE.

La dimension en plan optimale des cellules est fonction de la surface d'appui de la charge de service appliquée. Un diamètre nominal conventionnel des cellules alvéolaires de 25cm est admissible pour l'ensemble des charges routières.

L'investigation sur site de la portance du composé GCE/SDD, au biais de l'essai de plaque, montre des résultats assez comparables à ceux obtenus sur la partie ordinaire de la chaussée réalisée. Le programme expérimental n'a pu être achevé à fond par suite d'indisponibilité de moyens d'expérimentation en temps opportun. Cependant, les quelques résultats obtenus ambitionnent pour une convenance de mise en œuvre du procédé GCE/SDD. Un complément d'investigation, soigneusement conçu et largement appliqué est nécessaire pour conclure définitivement sur la vraisemblance de cette approche et ses conditions de mise en œuvre.

6. Références bibliographiques

- Allard R., Kienert G. (1981). Les Travaux Publics, page 133.
- Ayadi M. (2005). Gestion et évolution des réseaux routiers traversés par la transsaharienne, 1er Congrès Africain de la Route, Alger, 1-4.
- Baslimane B. (1994). Principaux aspects de technique routière Saharienne, 2ième Congrès Maghrébin de la Route, Biskra, 211-219.
- Boublal M. (2013). Géotechnique routière au Sahara 1950 – 2010 Bilan et recommandations, Séminaire national sur les matériaux locaux dans la construction, Université Kasdi Merbah, Ouargla, 20-21 février 2013.
- Daoud M. (2005). L'infrastructure de la Wilaya d'Adrar, 1er Congrès Africain de la Route, Alger, 1-8.
- Haouchine M. (1994). Guide de renforcement des chaussées souples en Algérie, 2ième Congrès Maghrébin de la Route, Biskra, 133-156.
- Ichtioui A., Kanaba T.H., El-Moussi M. (1994). Dégradation des chaussées en climat désertique, 2ième Congrès Maghrébin de la Route, Biskra, 41-62.
- Kalli F.Z. (1994). Méthodologie d'étude du comportement des tufs calcaires dans les assises des chaussées, 2ième Congrès Maghrébin de la Route, Biskra, 105-118.
- Khelifi M., Hadbi H. (2016). Drainage et renforcement par géosynthétiques sur sol compressible, J.E.S.T. sur les géosynthétiques, Ouargla, 2016.
- Kherfi H.B. (2001). Étude des matériaux à base d'argile en corps de chaussée d'In-Amenas (Réseau Tiguentourine - A. Larache, 3ième Congrès Algérien de la Route, Alger, 1-9.
- Morsli M., Bali A., Fleureau J.M. (2001). Particularités de la géotechnique routière Saharienne, 3ième Congrès Algérien de la Route, Alger, 26-28.
- Philipponnat G., Hubert B. (1997). Fondations et ouvrages en terre, Eyrolles, 576p.
- Touati-Tliba M.B. (1994). Particularités de dimensionnements des chaussées dans le contexte saharien, 2ième Congrès Maghrébin de la Route, Biskra, 221-229.