

LA GÉOGRILLE À MAILLES HEXAGONALE : UNE SOLUTION ÉCOLOGIQUE ET ÉCONOMIQUE POUR RÉDUIRE LES COUCHES DE FORME

HEXAGONAL MESH GEOGRID: AN ECONOMICAL AND ENVIRONMENTALLY FRIENDLY SOLUTION FOR REDUCTION OF THE AGGREGATES

Jean Luc MICHAUX¹, Patrick BROCHIER¹, Abdelghani MEKKAOUI²

1 Terageos, Veurey Voroize, France

2 Tensar, Vénissieux, France

RÉSUMÉ - Réaliser une couche de forme avec des contraintes de circulation et de portance nécessite des déblaiements et évacuations, ainsi que des apports de matériaux sains importants. La solution traditionnelle est lourde financièrement, prend du temps et a un impact carbone élevé. Face à ce constat, la société Tensar a développé une solution qui permet de réduire les épaisseurs de couche de forme en stabilisant mécaniquement les matériaux grâce à une géogrille à maille hexagonale. Cette solution contribue ainsi à réduire l'impact écologique des chantiers tout en optimisant les coûts de construction.

Mots clés : stabilisation, portance, route, plateforme, géogrille

ABSTRACT – Achieving a road subgrade with traffic and load-bearing constraints requires earthworks and granular inputs. The traditional solution is financially heavy, takes time and has a high carbon impact. To solve this problem, the Tensar company has developed a solution which allows to reduce the thickness of the layers by mechanically stabilizing the materials thanks to a geogrid with hexagonal mesh. This solution thus contributes to reducing the ecological impact of construction sites while optimizing construction costs.

Keywords: stabilization, road, platform, geogrid

1. Introduction

Lors de la construction de routes ou d'aires de stationnement et de stockage, un objectif de portance suffisante est impératif pour un fonctionnement optimal et durable. Lorsque les conditions de sol sont médiocres, ce qui est très souvent le cas, ces travaux nécessitent des purges en déblai et des volumes importants d'apports de remblais de granulats de bonne qualité.

En France plusieurs documents intègrent les géotextiles dans les chaussées afin de réduire la couche de forme. Malheureusement aucun document officiel ne traite de la réduction des épaisseurs de couches de forme en utilisant les géogrilles. Plusieurs recherches ont été menées dans ce sens et ont été publiées, qui démontrent l'intérêt d'utiliser les géogrilles pour réduire les épaisseurs de couches de formes et avoir une meilleure performance par rapport à des solutions traditionnelles en granulaire.

La société Tensar a développé une solution alternative grâce à une géogrille à maille hexagonale permettant de réduire les épaisseurs de couche de forme en stabilisant mécaniquement les matériaux, ou d'optimiser les couches d'enrobé. Cet article présente les essais réalisés pour arriver à ces résultats.

2. Réduction des épaisseurs des chaussées en utilisant les géosynthétiques

Le guide technique du SETRA « Réalisation des remblais et des couches de forme, Fascicule II, Annexe Technique » traite de l'utilisation des géotextiles pour la réduction des épaisseurs des couches de forme. Cependant, ce document n'explique pas comment choisir le géotextile, et ne donne pas la performance apportée par le géotextile à la structure de la chaussée. Aucune méthode de dimensionnement n'est fournie pour la chaussée en utilisant le géotextile.

Ces dernières années, une nouvelle approche de l'utilisation des géogrilles dans les structures de chaussées a été développée et est progressivement introduite dans différents pays. Cette approche consiste à analyser l'ensemble de la structure de la chaussée, y compris les couches d'amélioration du sol et la géogrille. Les avantages de la géogrille sont pris en compte dans le processus de conception des chaussées, en particulier : une augmentation substantielle de la durée de vie de la chaussée, qui peut être utilisée de deux manières. Premièrement, la réduction des coûts d'entretien grâce à une durée de vie accrue des chaussées. Deuxièmement, la réduction de l'épaisseur de la chaussée en incorporant la géogrille, baisse les coûts de construction, si la durée de vie de la chaussée doit rester inchangée par rapport à une conception de chaussée traditionnelle sans géogrille.

Cette approche est appelée « optimisation de la chaussée avec géogrid ». Elle peut être définie comme la conception d'une chaussée flexible pour permettre la réduction de l'épaisseur des couches - y compris les couches d'enrobés - tout en maintenant la durée de vie de la chaussée ou en augmentant la durée de vie de la chaussée tout en maintenant son épaisseur, ou une combinaison des deux.

L'utilisation des géogrilles dans l'optimisation des chaussées présente deux aspects nouveaux. D'une part, le revêtement complet avec les couches d'amélioration du sol est analysé et l'utilisation de la géogrid n'est pas limitée aux couches inférieures. Elle peut également être utilisée dans la couche de base des agrégats. D'autre part, l'optimisation des chaussées avec géogrid ne se limite pas aux sols de faible portance, mais elle peut être également utilisée pour les chaussées construites sur des sols de bonne portance.

3. Optimisation des chaussées

Aux États-Unis, cette approche est décrite dans la norme AASHTO R50-09 (2009) « Geosynthetic reinforcement of the aggregate base course of flexible pavement structures ». Cette norme décrit l'utilisation des géosynthétiques dans les structures de chaussées pour le support structurel des charges de trafic. La norme stipule que « On s'attend à ce que le géosynthétique offre l'un de ces avantages ou les deux : (1) durée de vie améliorée ou prolongée de la chaussée ou (2) épaisseur réduite de la section structurelle ».

AASHTO R50-09 ne fournit aucun détail sur les chaussées à conception géosynthétique. Il décrit plutôt la procédure qui devrait être adoptée par le fabricant du géosynthétique afin d'intégrer son influence dans la conception des chaussées. L'une des exigences importantes indiquée dans la norme est la nécessité d'essais de chaussée à grande échelle pour le géosynthétique considéré : « Comme les avantages des structures de chaussées renforcées par géosynthétiques ne peuvent pas être déduits théoriquement, des sections d'essai sont nécessaires pour obtenir une quantification des avantages » ; La norme reconnaît également que différents types de géosynthétiques peuvent fournir des performances différentes, et les résultats des tests ne sont donc applicables qu'au type de géosynthétique spécifique testé : « Les procédures de conception utilisent des paramètres d'entrée estimés expérimentalement qui sont souvent spécifiques au géosynthétique. Ainsi, les conceptions techniques calculées et les avantages économiques ne sont pas facilement transposables à d'autres géosynthétiques. »

En outre, le rapport récemment publié « Recommended practice for incorporating geogrids in ME pavement design » (Hyung Suk Lee, Décembre, 2017 Applied Research Associates, Inc.) note l'importance des tests nécessaires pour l'étalonnage de la conception des chaussées avec des géogrilles, en laboratoire et à grande échelle. Il est recommandé d'effectuer des essais accélérés de chaussée « pour recueillir les données nécessaires au développement des données de conception (...) (c'est-à-dire le module ajusté et les coefficients des fonctions de transfert) ».

L'élaboration (ou la modification) d'une méthode de conception de chaussée existante qui considère les avantages des géogrilles ne devrait pas être basée uniquement sur des considérations théoriques. Il est nécessaire d'effectuer un vaste programme d'essais, qui devrait inclure des essais accélérés de chaussée à grande échelle. Ceci permet d'obtenir des données qui permettront de quantifier les avantages d'une géogrid particulière et de développer la procédure pour mettre en œuvre ces avantages dans la conception de la chaussée.

Cet article décrit la modification de la méthode de conception mécanique - empirique des chaussées (MCMC), cette méthode est utilisée dans plusieurs logiciel comme Alizé – LCPC, mais sans prendre en considération les géosynthétiques. Les hypothèses de base de la méthode modifiée sont présentées, ainsi que les résultats des essais, y compris les essais accélérés de chaussée à grande échelle, qui soutiennent et justifient la méthode de conception décrite

4. Modification de la méthode de conception mécanique-empirique des chaussées (MCMEC)

Le but de cet article n'est pas de décrire la MCMEC lui-même en détail, mais de présenter certaines hypothèses de base pour faciliter l'explication de la modification.

La méthode de conception mécanique-empirique des chaussées combine deux parties. La partie mécanique est l'analyse du comportement de la couche de chaussée sous les charges des roues. Connaissant les caractéristiques de toutes les couches de chaussée (module d'élasticité, coefficient de Poisson et épaisseur), il est possible de prédire comment elle répondra à une seule charge de roue en utilisant la théorie élastique en multicouches. La réponse de la chaussée est exprimée en termes de contraintes et de déformations. La partie empirique est basée sur des tests en laboratoire et des observations réelles du comportement de différents matériaux sous des charges répétées. Cette partie

permet de prédire les répétitions de charges et, par conséquent, les répétitions de contraintes et de déformations, qu'une couche de matériau donnée peut supporter avant qu'elle ne se détériore. La dégradation est généralement définie en termes de fissuration ou de déformation de fatigue. Le nombre de répétitions de charge pour atteindre le niveau de dégradation admissible, c'est-à-dire la durée de vie de la chaussée, est calculé à l'aide d'équations appelées fonctions de transfert, cette dernière est un simple changement d'équation de fatigue des matériaux.

La procédure de base du MCMEC pour les chaussées souples, sous une forme très simplifiée, est présentée sur la Figure 1.

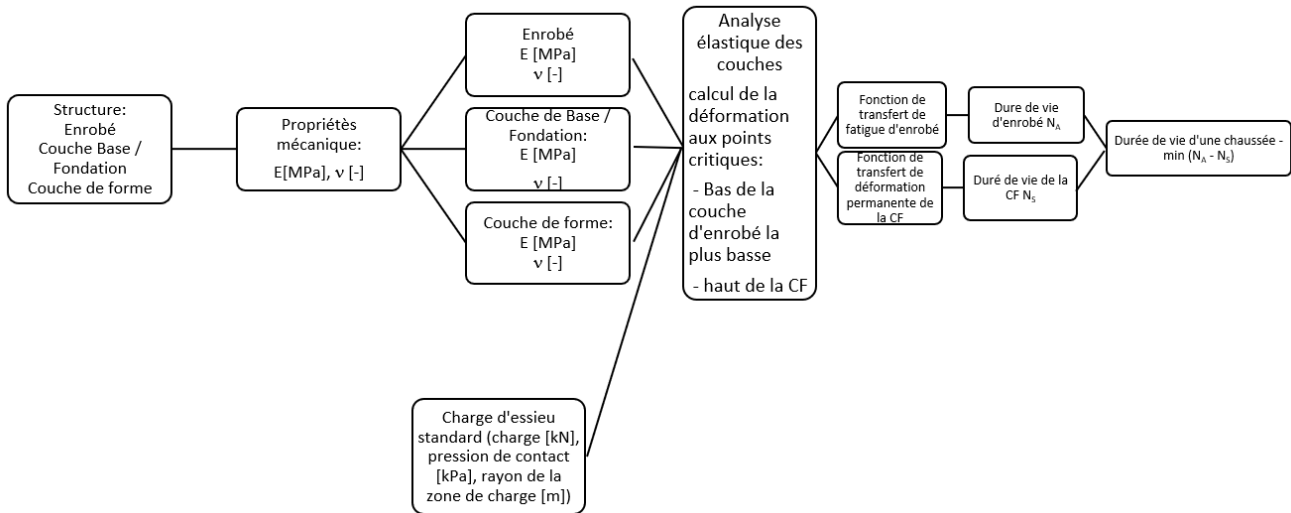


Figure 1. Procédure standard MCMEC simplifiée

Les données recueillies au cours des essais accélérés de chaussée à grande échelle, décrits plus loin, sont utilisées pour développer une modification de l'approche MCMEC typique afin de considérer l'effet de stabilisation de la ou des couches non liées avec une géogridde hexagonale.

Il y a deux facteurs distincts, mais simultanés, reflétant les effets bénéfiques d'une géogridde qui sont inclus dans la conception. Premièrement, le module de la couche d'agrégat stabilisée avec la géogridde est augmenté en multipliant la valeur initiale par un facteur de renforcement du module. Ceci est fait dans l'étape d'analyse élastique pré-linéaire. Les déformations dans les couches d'enrobé et la fondation aux points critiques sont calculées, et la durée de vie des couches est calculée, comme dans la procédure standard MCMEC. Ensuite, les facteurs de changement de vie sont appliqués à la durée de vie calculée, à la fois pour l'enrobé et le sol de fondation, pour déterminer la durée de vie finale de la chaussée en cours de conception.

La procédure modifiée du MCMEC pour les chaussées souples est présentée sur la Figure 2.

5. Essais de chaussée accélérés

Comme mentionné précédemment, une série d'essais accélérés de chaussée (APT) a été réalisée pour quantifier les avantages de l'utilisation de la géogridde de stabilisation hexagonale dans les chaussées souples. Trois étapes de tests ont été réalisées entre 2012 et 2016 au Centre de recherche et de développement des ingénieurs de l'armée américaine (The U.S. Army Engineer Research and Development Center). Une description détaillée des sections d'essai et des résultats est présentée dans les rapports suivants : Jersey et al. (2012), Norwood et al. (2014), Robinson et al. (2017).

Au total, 8 sections ont été testées - 4 avec une base d'agrégat stabilisée par géogridde hexagonale et 4 sections de contrôle sans géogridde. Toutes les chaussées testées ont été construites à l'aide d'équipements et de méthodologies de construction établis. Pour éliminer l'influence de facteurs environnementaux variables, des tests ont été menés à l'intérieur d'une chambre climatisée contenue dans un hangar fermé. La plate-forme avait une capacité portante de 3% ou 6% CBR. La base était constituée de 15 ou 20 cm de calcaire concassé. La couche de revêtement consistait en une couche d'un béton bitumineux à chaud (HMA) de 5, 7,5 ou 10 cm d'épaisseur sur six sections. La construction de sections avec surfacage HMA est illustrée par la Figure 3.

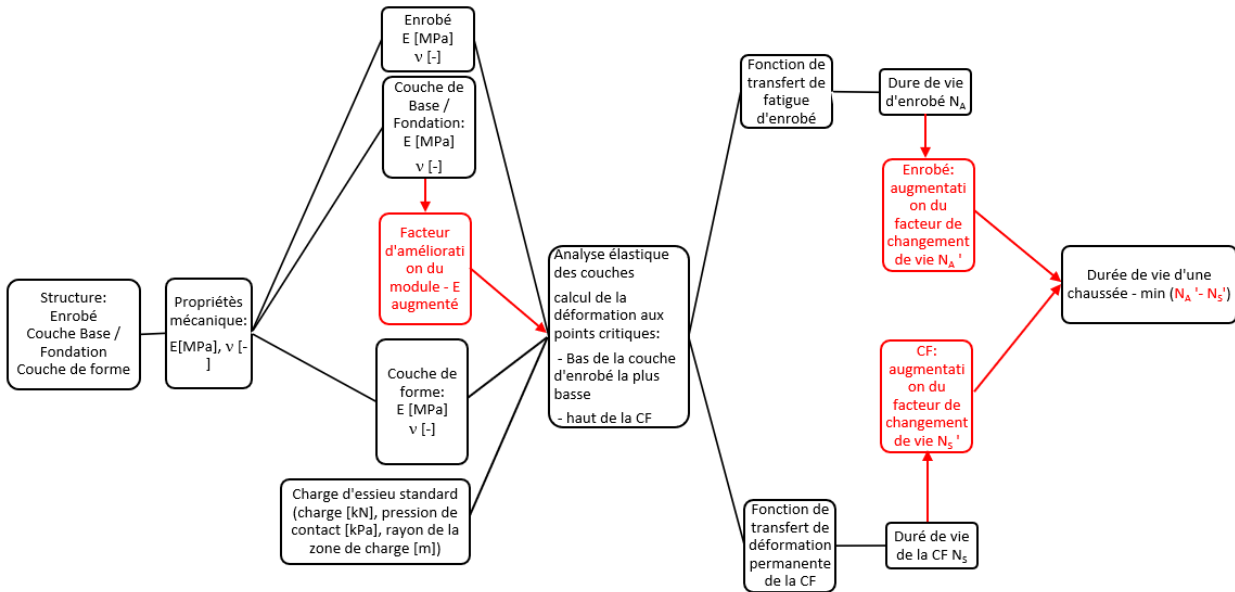


Figure 2. Procédure MCMEC modifiée pour inclure les avantages de la géogridde hexagonale

Section A	Section B	Section C	Section D	Section E	Section F
HMA – 5 cm	HMA – 5 cm	HMA – 7,5 cm	HMA – 10 cm	HMA – 7,5 cm	HMA – 7,5 cm
Couche Agrégat 20 cm	Couche Agrégat 20 cm	Couche Agrégat 20 cm	Couche Agrégat 20 cm	Couche Agrégat 15 cm	Couche Agrégat 15 cm
Géogridde 1			Géogridde 2		
Couche de forme - CBR 3% - EV2 = 15 MPa			Couche de forme - CBR 6% - EV2 = 25 MPa		

Figure 3. Sections de test ERDC avec couche de surface HMA

Le simulateur de véhicule lourd (HVS) a été utilisé pour le trafic des sections d'essai. Un groupe d'essieux à double essieu tandem chargé à 20000 lb (~ 90 kN) a été utilisé. Le HVS était équipé d'une chambre climatique entourant la section d'essai pour minimiser l'influence du changement de température sur le module de l'asphalte. Une température constante de 77°F +/- 10°F (25°C +/- 5,5°C) a été maintenue pendant les essais.

Des mesures de la profondeur des ornières ont été recueillies sur toutes les sections tout au long des essais. Les figures 6 et 7 présentent les résultats de la profondeur de l'ornièrre par rapport au nombre d'ESAL (charge d'essieu standard équivalente) provenant du trafic de sections d'essai avec 3% et 6% de fondation CBR. Aucune donnée sur la propagation des fissures n'a été recueillie car l'ornièrre était le mécanisme de dégradation décisif de toutes les sections.



Figure 4. HVS dans le hangar de l'ERDC



Figure 5. Engrenage à double roue à essieu tandem utilisé dans les tests ERDC

Les sections avec une couche de base agrégée stabilisée avec des géogrilles hexagonales ont obtenu de meilleurs résultats que la section témoin non stabilisée. Le nombre d'ESAL (charge d'essieu standard équivalente) pour atteindre une profondeur d'ornièrè donnée était significativement plus élevé, même pour les sections stabilisées qui avaient des couches d'asphalte et / ou de base plus mince que les sections non stabilisées. La section non stabilisée D a donné des résultats similaires aux sections stabilisées E et F jusqu'à 300 000 ESAL, mais au-delà, elle a commencé à se détériorer plus rapidement.

L'une des conclusions importantes de ces tests est que la stabilisation de la base avec des géogrilles hexagonales est également bénéfique pour les structures construites sur des sols fermes. Une plate-forme d'indice CBR égal à 6% ($E_{v2} = 25\text{MPa}$) est généralement considérée comme bonne, et dans ce cas, l'utilisation de géogrilles n'est généralement pas envisagée. Les géogrilles sont généralement utilisées pour une fondation d'indice CBR <5%. Les tests décrits ci-dessus prouvent que l'idée d'optimisation de la chaussée avec des géogrilles hexagonales peut être utilisée dans le cas de chaussées construites sur une fondation ferme.

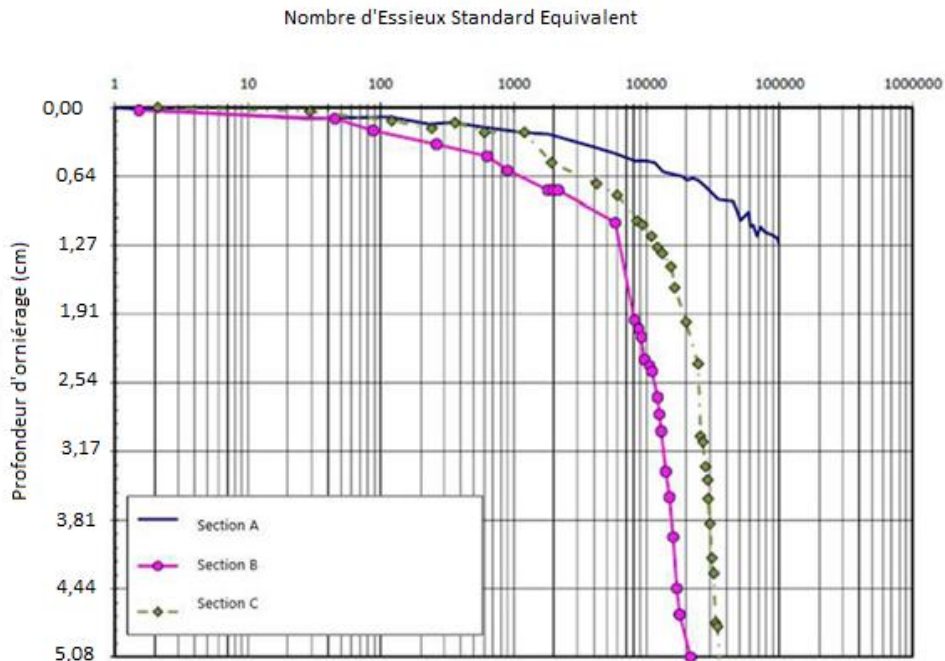


Figure 6. Effets du trafic pour les sections sur une plateforme d'indice CBR 3%

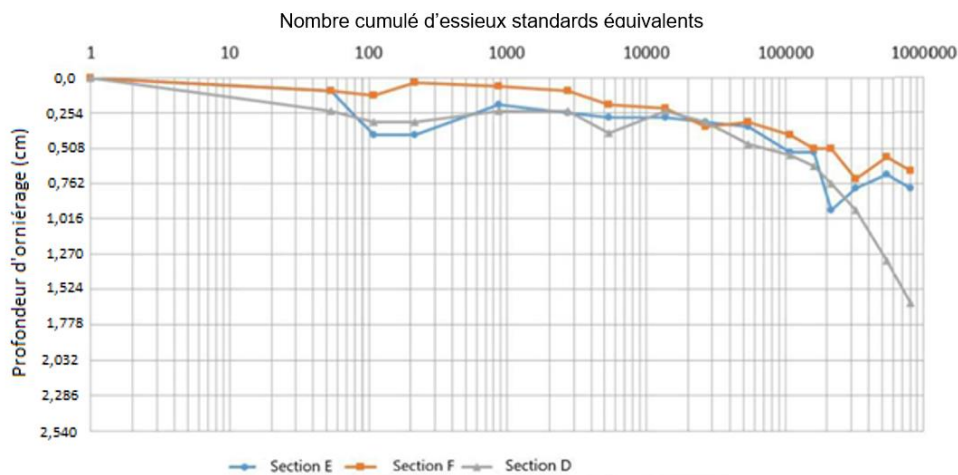


Figure 7. Effets du trafic pour les sections sur une plateforme d'indice CBR 6%

6. Amélioration du module des agrégats stabilisés

Le module de l'agrégat non lié est fonction de l'état de contrainte. Lorsqu'un agrégat bien classé non lié est placé et compacté sur une couche de géogrille hexagonale rigide, les particules d'agrégat s'emboîtent dans les ouvertures de la géogrille et sont confinées par ses nervures rigides. Un composite géogrille / agrégat est créé, dans lequel la retenue latérale fournie par la géogrille réduit la déformation et augmente les contraintes principales agissant sur un agrégat, augmentant ainsi la rigidité de la couche par rapport à la même couche sans géogrille.

Ce phénomène a été confirmé par des tests en laboratoire. Kwon et coll. (2012) ont utilisé une combinaison de tests AASHTO T307 (Determining the resilient modulus of soils and aggregates) et NCHRP 598 (Repeated load permanent deformation) pour tester des échantillons de gravier limoneux stabilisés et non stabilisés. Une augmentation du module de 5% à 20% a été observée dans les échantillons stabilisés par géogrille hexagonale.

Des tests de module de résilience sur le terrain menés avec le système APLT (Automated plate load test) ont également confirmé une augmentation du module des couches d'agrégats stabilisés par géogrille. L'APLT est un appareil conçu pour mesurer le module élastique in situ et la déformation permanente d'une couche sous un très grand nombre de cycles de charge. De nombreux tests ont démontré une augmentation du module de 5% à 30% des sections stabilisées par géogrille par rapport aux sections témoins non stabilisées (White, 2014a ; White, 2014b).

7. Rétro-calcul du module de couche

Des calculs rétrospectifs des résultats d'essais ont été effectués avec une méthode mécanique-empirique pour estimer l'amélioration nécessaire du module d'agrégat qui entraînerait une durée de vie de la chaussée similaire à la durée de vie des sections observées dans les essais APT. Au départ, la manière la plus simple de modifier le MCMEC semblait être de supposer une augmentation du module de la couche d'agrégats suite à une stabilisation avec une géogridde hexagonale.

Le mécanisme de rupture décisif de toutes les sections testées était la déformation permanente de la chaussée. Dans de nombreuses fonctions de transfert utilisées dans le monde, une profondeur d'orniérage de 12 à 12,5 mm est considérée comme représentant une défaillance de la chaussée. Dans quatre des six sections d'essai décrites ci-dessus, la profondeur de l'ornière a atteint au moins 0,5 pouce (~ 12,5 mm), et dans les deux autres sections, le trafic pour atteindre cette profondeur de l'ornière peut être extrapolé. Par conséquent, il était possible d'étalonner les paramètres des couches stabilisées par géogridde de manière à ce que les résultats des calculs correspondent aux résultats des tests.

Les sections de chaussée ont été modélisées dans le programme d'analyse des chaussées élastiques multicouches ERAPAVE, en utilisant les paramètres suivants :

couches d'enrobé : $E = 3000 \text{ MPa}$, $\nu = 0,30$

base de granulats broyés : $E = 200 \text{ MPa}$, $\nu = 0,30$

Les épaisseurs des couches ont été tirées des rapports d'essais (Jersey et al., 2012 ; Norwood et al., 2014 ; Robinson et al., 2017) en tant qu'épaisseurs telles que construites, mesurées à partir d'exhumations de chaussées post-test. De plus, la résistance de la fondation n'a pas été prise comme l'indice CBR nominal de 3 et 6%, les valeurs réelles mesurées pendant la construction de la section ont été utilisées. Les valeurs d'indice CBR à E2 ont été recalculées avec l'équation suivante :

$$E2 = I_{\text{CBR}} * 10 \text{ [MPa]}$$

On a supposé que le coefficient de Poisson pour le sol de fondation était de 0,35.

La charge à l'essieu a été modélisée pour refléter la charge réelle appliquée pendant l'essai. La charge totale de l'engrenage d'essai était de 89 kN, appliquée à deux roues jumelées. La distance entre les roues étant de 117 cm, chaque passage de roue peut être traité comme une charge distincte. La distance entre les pneus de chaque roue double était de 35,6 cm et la pression de contact était de 827 kPa.

En vue de la présentation des résultats dans les rapports d'essai, la charge réelle a été recalculée en ESAL (charge d'essieu standard équivalente), avec un facteur de 2,08 (chaque charge réelle des engrenages équivaut à 2,08 charges d'essieu standard équivalentes à 80 kN). En vue des calculs présentés dans cet article, les résultats ont été recalculés pour obtenir le nombre de charges réelles des engrenages, puis divisés par 2 pour obtenir le nombre de charges réelles sur deux roues.

La première étape du calcul rétrospectif a été l'étalonnage pour choisir la fonction de transfert (TF) d'orniérage de fondation la plus appropriée. Différents TF utilisés dans le monde donnent généralement des résultats différents pour une déformation verticale donnée. La durée de vie calculée d'une même chaussée peut différer d'un ordre de grandeur.

Les calculs initiaux ont été effectués avec les TF d'orniérage de fondation suivant :

Asphalt Institute 12,5 mm d'orniérage de fondation

Austroroads 95% 12 mm d'orniérage de fondation

TRRL 10 mm d'orniérage de fondation

Fondation sud-africaine SAPEM 10 mm d'orniérage

Nottingham University

La meilleure concordance entre les résultats des calculs et les résultats des tests a été obtenue en utilisant la fonction de transfert d'orniérage de fondation Asphalt Institute de 12,5 mm. Toutes les autres fonctions de transfert (TF) utilisés ont abouti à une durée de vie beaucoup plus élevée que celle observée lors des tests, les Austroroads TF entraînant une durée de vie maximale.

La fonction de transfert (TF) est donnée par la relation :

$$\varepsilon = k * (1/N)^m$$

où :

ε - déformation de compression verticale en haut de la fondation

N - nombre de charges par essieu pour atteindre une profondeur d'orniérage de 12,5 mm

k = 0,0105

m = 0,223

Le tableau 1 montre les détails de l'épaisseur des couches et de la résistance de la sous-couche des sections analysées, ainsi que la durée de vie de la chaussée observée pendant l'essai et calculée à nouveau. Trois sections de contrôle non stabilisées ont été vérifiées pendant le processus d'étalonnage.

Tableau 1.

Section	Couche de forme Indice CBR [%] – E_{v2} [MPa]	Couche de base [cm]	Enrobé [cm]	Nombre d'essieux standard équivalent pour 12,5 mm d'orniérage	Nombre de charges réelles des engrenages jusqu'à 12,5 mm	Déformation verticale sur le dessus de la couche de forme [μ déformation]	Nombre de charges d'engrenage jusqu'à une profondeur d'orniérage de 12,5 mm - Enrobé Institut TF
B	2,9 – 17,4	20,5	5,1	5400	1298	1934	1946
C	2,8 – 16,8	20,1	7,6	12640	3038	1652	3946
D	5,9 – 35,4	19,6	10,2	500000	120192	914	56089

8. Conclusion

La géogrille à maille hexagonale mise au point grâce à plus de 40 années de recherche et développement permet de réduire les épaisseurs de matériaux granulaires de plus de 30 à 40% dans les projets de stabilisation, et d'augmenter la durée de vie des ouvrages réalisés. Les tests à grande échelle effectués montrent qu'elle permet également de réduire les couches d'enrobés, ou d'augmenter la durée de vie d'un enrobé, à épaisseur égale. Cette alternative au tout granulaire, simple à mettre en œuvre, économique et écologique donne satisfaction à des entreprises en quête de solutions techniques fiables, éprouvées, et financièrement adaptées.

9. Références

- Chaddock H.J. (1985). Deformation of a haul road reinforced with a geomesh, Proc. 2nd Symp. On unbound aggregates in roads, University of Nottingham.
- Guide technique, Réalisation des remblais et des couches de forme, *Fascicule 1, principe généraux*, SETRA – LCPC.
- Guide technique, Réalisation des remblais et des couches de forme, *Fascicule 2, Annexes techniques*, SETRA – LCPC.
- Huang H., Kwon J., Liu S., Giu T. (2017). Comparative Evaluation of Particle Movement in a Ballast Track Structure Stabilized with Biaxial and Multiaxial Geogrids - Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board.
- Jersey S.R., Tingle J.S. (2009). Cyclic plate testing of geogrid reinforced highway pavements. US Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center
- Mazurowski P., Buckley J., Kawalec J. (2019). Modification of mechanistic-empirical pavement design method to incorporate the influence of hexagonal stabilisation geogrids. 18th AAPA International Flexible Pavements Conference 2019; Sydney, New South Wales, Australia.
- Michaux J.L., Brochier P., Mekkaoui A. (2019). Stabilisation par géogrille à mailles triangulaires, *12èmes Rencontres Géosynthétiques*,