

DISPOSITIF D'ÉTANCHÉITÉ SUR UN DÉPÔT DE BOUES ROUGES : CONTRIBUTION DES GÉOGRILLES DE RENFORT ET DE STABILISATION

GEOSYNTHETIC LINING SYSTEM ON A SOFT RED MUD POND : USE OF REINFORCEMENT AND STABILISATION GEOGRIDS

Sébastien GASTAUD
France Maccaferri, Valence, France

RÉSUMÉ – Cet article présente un chantier d'ampleur sur un site industriel où l'utilisation de géogrilles a permis la réalisation d'un bassin de rétention d'eaux pluviales fondé sur des boues rouges, un matériau plastique et thixotrope. Ce bassin de 110 000 m³ collecte l'ensemble des eaux de ruissellement du site et évite leur relargage dans l'environnement. Il est installé au point bas du site sur un bassin de boues rouges non consolidées sur lequel il demeurerait impossible de marcher. Afin d'installer le dispositif d'étanchéité par géosynthétiques dans de bonnes conditions, deux types de géosynthétiques ont été installés dans l'assise du bassin : un géocomposite de stabilisation pour assurer la traficabilité et une géogrille de renforcement pour protéger le dispositif d'étanchéité d'une déformation excessive.

Mots-clés : géogrille, renforcement, stabilisation, boues rouges

ABSTRACT – This paper presents a jobsite of exceptional size and technicity where geogrid have allowed to realize a rainwater basin grounded on a red mud deposit, a very soft and thixotropic material. This 100 000 m³ basin collects the major part of the run-off water flowing on the industrial site and avoid the discharge of this water into the environment. Before the jobsite, it was impossible to walk on the red mud, which are stayed unconsolidated since their deposit. In order to install in good conditions the lining system on the red mud, deux types of geosynthetics was installed in the base on the basin: a geocomposite of stabilization to guaranty enough trafficability on red mud to and a reinforcement geogrid in order to protect lining system from excessive elongation during the whole lifespan of the basin.

Keywords: Geogrid, reinforcement, stabilisation, red mud.

1. Introduction

Cet article présente un chantier d'ampleur sur un site industriel où l'utilisation de géosynthétiques a permis de réaliser un bassin de rétention d'eaux pluviales fondé sur des boues rouges, un matériau plastique et thixotrope. L'aluminium est fabriqué à partir d'alumine extraite de la bauxite grâce au procédé Bayer. Les co-produits de cette extraction forment les boues rouges (BR). Ces résidus très basiques sont extrêmement fins et très riches en eau, leur donnant un comportement de fluide non newtonien pseudo-plastique hautement visqueux. Le stockage des BR et la réhabilitation des dépôts de BR est un enjeu partout dans le monde.

À Gardanne, le site industriel fabrique des alumines depuis 130 ans. Sur le site de Mange-Garri tout proche, de grandes quantités de BR ont été stockées. Dans le bassin B7, des boues rouges riches en eau sont déposées depuis plusieurs décennies sur une épaisseur allant jusqu'à 20 m. Bien que la surface de B7 soit asséchée sur une dizaine de centimètre, il demeurerait impossible de marcher sur le site, les matériaux se comportant comme des sables mouvants. Aucun engin motorisé ne pouvait évoluer sur ce bassin.

Altéo, le propriétaire du site lors de la réalisation de ce chantier, est engagé dans une démarche de réduction de ses impacts sur l'environnement. Parmi ses projets, la création d'un bassin d'eaux pluviales de 110 000 m³ collectant l'ensemble des eaux de ruissellement du site et évitant leur relargage dans l'environnement. Ce bassin de rétention devait être construit sur le bassin B7 actuel. Avec les boues rouges en place fluides et non consolidées, l'installation du dispositif d'étanchéité (GSB et Géomembrane) était impossible. Des essais de cloutage avec du matériaux très grossiers et des essais de traitement aux liants hydrauliques ont été tentés sans succès. La solution géosynthétique est vite apparue comme incontournable. Deux types de géosynthétique assurant des fonctions distinctes ont été employés afin de préparer une assise stable au futur bassin étanche :

- Afin d'assurer la traficabilité, il a été nécessaire d'installer un géocomposite constitué d'un géotextile de filtration et d'une géogrille de stabilisation.

- Afin de protéger le dispositif d'étanchéité d'une déformation excessive en cas de tassement différentiel, une géogrille de renforcement a été utilisée.

Dans la première partie, le contexte général des boues rouges à Gardanne est rappelé. Ensuite le projet de bassin fondé sur les BR est présenté. Enfin les deux solutions géosynthétiques sont explicitées et des photos de leur mise en œuvre sont reportés.

1.1. Contexte du site de Gardanne

L'aluminium est fabriqué à partir d'alumine, l'oxyde d'aluminium (Al_2O_3). La roche mère est la bauxite qui contient environ 50% d'alumine. L'extraction de l'alumine de la bauxite s'effectue grâce au procédé Bayer, développé en 1893 à Gardanne (13) : la bauxite est broyée en particules de moins de 315 μm , qui sont ensuite attaquées à la soude à haute température (250°C). La solution obtenue est lavée à plusieurs reprises pour extraire la liqueur d'alumine. Il résulte de cette extraction, des boues rouges (BR) constituée majoritairement d'eau, d'oxyde de fer et de quartz, et contenant des traces l'alumine et de métaux lourds. Les boues rouges sont très basiques, leur pH est compris entre 8,4 et 12,6 et sont extrêmement fines, avec un d_{50} entre 3 μm et 15 μm . Les boues rouges ont un comportement de fluide non newtonien pseudo-plastique hautement visqueux, leur siccité est comprise entre 30 et 40%, et ne se consolident pas.

A Gardanne, en 1894, l'usine d'alumine Péchiney fut la première au monde à exploiter le procédé Bayer pour extraire des alumines à partir de la bauxite. Ces alumines furent d'abord employées pour produire de l'aluminium puis plus récemment pour produire des alumines de spécialité utilisées notamment dans les abrasifs, les matériaux réfractaires, les céramiques et les isolants.

En 130 ans d'exploitation, des dizaines de millions de tonnes de boues rouges ont été produites. D'abord stockées à terre, l'emprise foncière exigée par les bassins de résidus (plusieurs dizaines d'hectare) poussa l'industriel à trouver une autre solution : les rejeter directement dans la Méditerranée. En 1966, un pipeline de 55 km de long fut construit, il débouche à 7 km de la côte par 320 mètres de fond, en tête de la fosse de Cassidaigne. Entre 1966 et 2015, ce pipeline a évacué au fond de la Mer des millions de tonnes de boues rouges produites par l'usine. Ces matériaux se comportent comme des sédiments, se déposant sur l'ensemble de la fosse, jusqu'à plus de 2000 m de profondeur. Le front de sédimentation est à plus de 60 km du point de dépôt et avance de plusieurs kilomètres par an. Depuis 2015, les boues rouges sont à nouveau gérées à terre : elles sont asséchées grâce à des filtres presses de très grande capacité puis déposées sur le site de Mange Garri. Dans cet état hydrique, les résidus de bauxite sont des matériaux pouvant être utilisée comme remblai.

Depuis 130 ans, sur le site de Mange-Garri tout proche de l'usine de Gardanne, de grandes quantités de boues rouges ont été entreposées. Le bassin B7 résulte du comblement d'un vallon à la suite de la réalisation d'une digue à l'aval (Figures 1 et 2) ; au plus profond, 20 m de boues rouges sont présents. Du fait de sa position basse, le bassin B7 reçoit une bonne partie des eaux de ruissellement du site de Mange-Garri. Ainsi, depuis leur dépôt dans B7, les BR ne se sont pas consolidées : bien que la surface de B7 soit asséchée sur une dizaine de centimètres (Fig. 3), il demeurerait impossible de marcher sur le site, les BR se comportant comme des sables mouvants. Aucun engin motorisé ne pouvait évoluer sur ce bassin.



Figure 1. Vue Satellite du bassin B7 du site de Mange Garri. Au Nord du bassin, la plage de dépôt consolidée, et au sud du bassin une zone avec un surnageant sur les boues rouges liquides



Figure 2. Vue du bassin B7 depuis la plage au Nord



Figure 3. Surface de B7 : boues rouges asséchées en surface mais liquides à faible profondeur

1.2. Projet de création d'un bassin d'eaux pluviales

Comme indiqué plus haut, un bassin d'eaux pluviales de 110 000 m³ devait être implanté au point bas du site, c'est-à-dire sur le bassin B7. Le bassin de rétention devait donc être installé sur des épaisseurs de 0 à 20 m de boues rouges fluides et non consolidées, sur lesquelles il était impossible de marcher. Deux problématiques majeures sont alors apparues :

- Avoir une traficabilité suffisante à la surface de B7 pour installer un dispositif d'étanchéité par géosynthétique (DEG). Il est primordial de permettre aux soudeurs et aux engins de se déplacer en sécurité.
- Assurer que, malgré les tassements différentiels inéluctables, le DEG conserverait son intégrité durant toute la durée de vie de l'ouvrage (120 ans) en évitant une déformation excessive.

Dans un premier temps, deux solutions traditionnelles ont été évaluées. Des essais de cloutage avec du matériau très grossiers ont été conduits ; le 0/250 déversé sur les boues rouges s'incorporait immédiatement dans la boue, sans jamais obtenir de refus et d'augmentation de portance en surface. Ensuite des essais de traitement aux liants hydrauliques ont été tentés sans succès. Face à l'échec de ces deux méthodes traditionnelles, la solution géosynthétique a été envisagée.

2. Solutions géosynthétiques proposées

Le bassin de rétention devait être construit sur des boues rouges non consolidées sur lesquelles la circulation et *a fortiori* l'installation du dispositif d'étanchéité (GSB et Géomembrane) étaient impossibles. La solution géosynthétique est apparue comme incontournable, deux types de géosynthétique assurant des fonctions distinctes ont été employés afin de préparer une assise stable au futur bassin étanche (Fig. 4) :

- Afin d'assurer la traficabilité, un géocomposite de stabilisation composé d'un géotextile de filtration et d'une géogrille de stabilisation a été déroulé directement sur les boues rouges.
- Afin de protéger le dispositif d'étanchéité d'une déformation excessive en cas de tassement différentiel, une géogrille de renforcement a ensuite été installée.

Le remblai utilisé entre le géocomposite de stabilisation et la géogrille de renforcement et celui utilisé entre la géogrille et le GSB est un résidu de bauxite asséché au filtre presse.

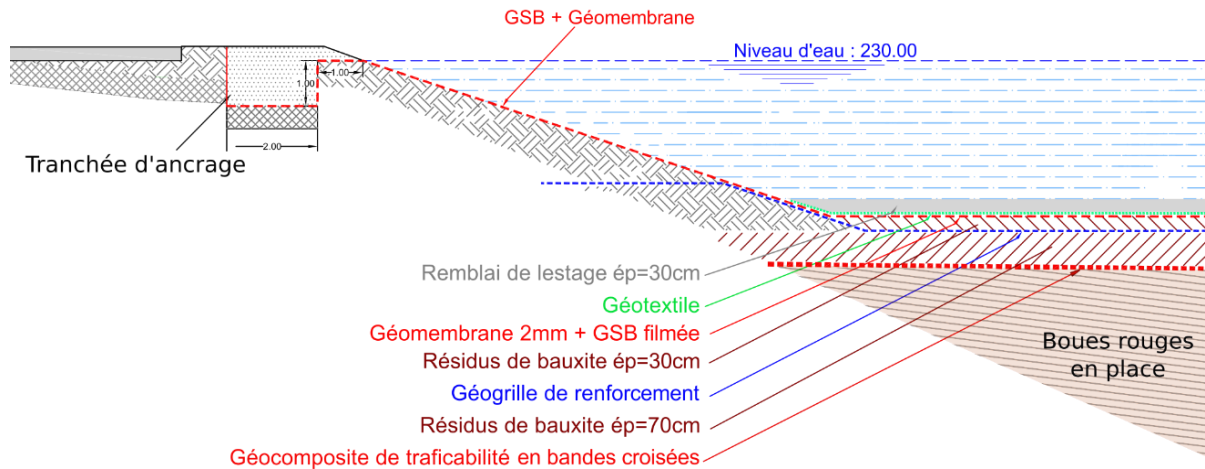


Figure 4. Coupe type du dispositif d'étanchéité associé aux géogrilles et géocomposite.

2.1. Géocomposite de stabilisation

Les boues rouges du bassin B7 ont une teneur en eau qui les rendent impossibles à trafiquer, même à pied dans les zones les plus humides. En effet, les boues rouges ont un comportement thixotrope : lorsqu'elles sont cisailées, elles se liquéfient. Pour stabiliser la couche de résidus issus du filtre presse, il convenait de limiter le cisaillement des boues rouges sous-jacentes. Il fallait donc interposer un élément particulièrement raide et frottant entre les boues rouges et les résidus de bauxite asséchés.

Les géogrilles de stabilisation sont reconnues pour améliorer la portance et la traficabilité depuis plusieurs décennies. Depuis 2016, la fonction *stabilisation* est officiellement reconnue par l'ISO/TC 221 dans la norme terminologique ISO 10318 (Corbet et Cazzuffi, 2007) et se définit comme la capacité à améliorer les propriétés mécaniques d'une couche de matériau non lié en diminuant les déformations sous les charges appliquées. Les géogrilles de stabilisation doivent présenter une grande résistance à la fatigue car elles sont mobilisées par des charges cycliques (circulation d'engin, de véhicule...) (Leng et Gabr, 2002). Ces géogrilles se caractérisent par une forte raideur initiale à la traction et une forte rigidité en flexion / torsion des mailles carrées. Ces caractéristiques permettent de confiner les matériaux dans les mailles de la géogrille et ainsi éviter leur déplacement lors des chargements successifs, ce phénomène est appelé interblocage. Il existe des méthodes permettant de dimensionner les couches de forme stabilisées par géogrilles (AASHTO, 2011 ; Leng et Gabr, 2002 ; Giroud et Han, 2004 a et b).

Les géogrilles de stabilisation sont fabriquées à partir de polypropylène (PP) extrudé puis étiré. Ce processus engendre une forme d'écrouissage du PP, en orientant les chaînes polymériques dans les 2 directions de traction. Ce mode de fabrication confère aux géogrilles de stabilisation leurs grandes raideurs en flexion / traction et torsion. Par ailleurs, le PP est un polymère inerte chimiquement : il résiste parfaitement à un milieu très basique comme celui des boues rouges.

Pour ce chantier, la géogrille de stabilisation devait être installée directement sur les boues rouges fines et saturées en eau. Il est apparu essentiel d'associer la fonction filtration à la fonction stabilisation. Afin d'éviter le mélange entre les résidus de bauxite asséchés et les boues rouges en place, un géocomposite associant une géogrille de stabilisation en PP (40 kN/m de résistance dans les 2 directions) et un géotextile de filtration également en PP a été testé sur le site. Deux essais ont été réalisés sur le bassin B7 du site de Mange Garri : en juin 2019 dans la zone la plus humide afin d'obtenir une traficabilité piétonne et pour les petits engins de reconnaissance géotechnique. Le second en juillet 2019, lors de la construction de la piste centrale traversant le bassin du Nord au Sud. 0,7 m de résidus de bauxite asséchés ont été déversés au tombereau et poussés au bull sur le géocomposite de stabilisation (Fig. 5).



Figure 5. Installation du géocomposite de stabilisation lors de la réalisation de la piste centrale.

Grâce à ses mailles carrées rigides et à son épaisseur, la géogrille a un frottement élevé avec les résidus de bauxite issus de filtre presse. Grâce à sa très forte raideur, la géogrille supprime les efforts cisailant à la base de la couche de résidus de bauxite issus de filtre presse : les boues rouges fluides sous la géogrille ne sont plus cisillées, elles ne subissent plus leur comportement thixotrope. Ainsi, la liquéfaction des boues rouges est limitée : il en résulte une portance largement améliorée. Les essais ont montré la capacité de la Macgrid CE 40S à :

- augmenter la portance : des hommes et un petit chenillard peuvent circuler en sécurité sur le géocomposite, sur les boues rouges les plus liquides, là où c'était impossible sans géocomposite.
- limiter le poinçonnement des boues rouges en place lors de la mise en œuvre des résidus issus de filtre presse. Les résidus issus de filtre presse ne s'incorporent plus aux boues rouges.
- limiter l'orniérage sur la couche de résidus issus de filtre presse : les bulls et les tombereaux évoluent en sécurité sur le fond de forme, sans détériorer le support.

Les résultats obtenus ont validé la structure finale de l'assise du DEG : avec 2 couches croisées de géocomposite de stabilisation et 0,8 m de résidus de bauxite on obtient une surface suffisamment porteuse pour la circulation des engins de chantier sans orniérage marqué en surface (Fig. 6).



Figure 6. Installation du géocomposite de stabilisation en 2 nappes croisées.

2.2. Géogridde de renforcement

2.2.1 Présentation de la solution

La géomembrane a une unique fonction : l'étanchéité. Pour assurer cette fonction à long terme, elle ne doit pas être sollicitée en traction pour éviter sa déformation au-delà d'un seuil admissible. Un bureau d'étude externe spécialisé dans le dimensionnement des géosynthétiques a réalisé une modélisation aux éléments finis afin de dimensionner une géogridde de renforcement installée 0,3 m sous la géomembrane, et qui limitera la déformation de cette dernière à 1 %. Cette géogridde reprendra les efforts en traction dus aux tassements différentiels inéluctables avec des épaisseurs de boues rouges sous le futur DEG variant de 0 à 20 m. Le dimensionnement a abouti à une géogridde qui doit présenter une résistance à la traction à long terme (120 ans) de 30 kN/m à seulement 3% de déformation dans les conditions du projet (pH très basique).

Une géogridde de la gamme Paragrid a été sélectionnée : ces géogrilles se caractérisent par leur conception unique : les fils de renfort en PET sont gainés avec du PEHD, un polymère inerte (utilisé pour la géomembrane). L'extrusion de la gaine PEHD autour des fils de renforts les isole de l'environnement, comme le fait une gaine isolante autour d'un fil électrique. Ainsi les géogrilles à renfort gainé peuvent être utilisées dans tous les milieux, y compris les plus extrêmes comme les boues rouges.

2.2.2 Justification de la géogridde

La justification est l'étape permettant de calculer la résistance à la traction nominale que doit présenter la géogridde pour assurer une résistance à la traction à long terme supérieure à l'effort calculé lors du dimensionnement. Ici, la géogridde devait présenter une résistance à la traction dans 120 ans et à 3% de déformation supérieure à 30 kN/m, soit une raideur de 1000 kN/m. Pour déterminer la résistance à long

terme, il faut connaître les coefficients réducteurs s'appliquant spécifiquement aux géogrilles utilisées. Le *British Board of agreement* (BBA) est un organisme britannique qui fait référence sur les géogrilles de renfort. Le BBA publie des certificats (disponible sur www.bbacerts.co.uk) sur un grand nombre de géogrilles. Ces certificats compilent, pour chaque gamme de géogrille certifiée, l'ensemble des données techniques mesurées en laboratoire sur les géogrilles. On y retrouve les caractéristiques mécaniques à court terme (résistance, courbe contrainte / déformation) et les facteurs de réduction mesurés en laboratoire pour diverses conditions :

- de pH et de température pour la dégradation chimique,
- de température pour le fluage,
- de granularité du matériau mis en œuvre sur la géogrille et d'intensité de compactage pour l'endommagement.

Le BBA offre donc aux maîtrises d'ouvrage et d'œuvre la possibilité d'avoir accès à une information fiable et complète pour s'assurer de l'adéquation entre la géogrille proposée et les problématiques propres à leur chantier. Pour ce chantier sensible, la géogrille devait être certifiée par le BBA. Dans le tableau 1, l'ensemble des coefficients réducteurs issus du certificat BBA de la géogrille utilisée sont précisés. Ces facteurs correspondent à ceux préconisés dans la norme BS 8006 (2010).

Tableau 1. Coefficients de réduction de la géogrille utilisée (*HAPAS Certificate 6/H249, BBA 2021*)

Coefficients réducteurs (CR) certifiés par le BBA / Conditions considérées	Valeurs BBA
CR lié au fluage T_{flu} / 120 ans ; 20°C	1,38
CR lié à l'endommagement à la mise en œuvre T_{end} / <i>Concrete Sand</i> $D_{50} = 0,7$ mm $D_{90} = 4$ mm	1,01
CR lié à la dégradation chimique T_{deg} / 120 ans ; 20°C ; $9,6 < pH < 11$	1,12
CR lié à l'extrapolation des données mécaniques et chimiques ($R1 \times R2$)	1,05
Coefficient de réduction global = $T_{flu} \times T_{end} \times T_{deg} \times R1 \times R2$	1,64

Ci-dessous les principales étapes de la justification sont décrites :

1. Couple contrainte / déformation issu de la modélisation du bureau d'étude = 30 kN/m à 3 % de déformation

2. Résistance à la traction à long terme à la déformation maximale : 30 kN/m / 34 % (taux de mobilisation de la géogrille à 3 % de déformation) = 88 kN/m

3. Résistance à la traction à court terme à la déformation maximale : 88 kN/m x 1,64 (Coefficient de réduction global) = 145 kN/m

La géogrille installée sur ce chantier a une résistance à la traction de 150 kN/m ce qui lui permet d'avoir une résistance à long terme et à 3 % de déformation supérieure à 30 kN/m.



Figure 7. Installation de la géogrille de renforcement

3. Conclusions

Ce retour d'expérience sur un chantier de grande ampleur illustre la polyvalence et l'efficacité des géosynthétiques. Leur utilisation a permis de réaliser un bassin de rétention d'eaux pluviales fondé sur des boues rouges, un matériau plastique et thixotrope. Deux types de géosynthétiques ont été utilisés, l'un pour assurer la traficabilité du site et l'autre pour protéger le dispositif d'étanchéité de déformation excessive.

Tout d'abord, des essais préliminaires ont montré que le géocomposite de stabilisation augmentait instantanément la traficabilité : des hommes et des chenillards peuvent circuler dessus là où c'était impossible sans. Le géocomposite de stabilisation est apparu comme une disposition constructive essentielle pour rendre réalisable ce chantier dans des conditions de sécurité satisfaisantes. Composée d'un géotextile de filtration et d'une géogrille de stabilisation en polypropylène extrudé, ce géocomposite assure la séparation entre les boues rouges et le remblai en résidus de bauxite asséchés et limite les efforts cisailant dans les boues rouges. Moins cisailées, les boues rouges se liquéfient moins sous la sollicitation des engins circulant sur le remblai. L'orniérage est ramené à un niveau acceptable (quelques centimètres) pour réaliser le terrassement et poser le DEG dans des conditions optimales.

Par ailleurs, le DEG étant posé sur un dépôt de boues rouges d'épaisseur variables de 0 à 20 m, des tassements différentiels de forte magnitude sont attendus. Pour assurer la pérennité de l'étanchéité sur toute la durée de vie de l'ouvrage, la géogrille de renforcement a été installée afin de protéger la géomembrane d'une déformation excessive. Le dimensionnement a été réalisé par un bureau d'étude spécialisé, qui a prescrit une géogrille de raideur 1000 kN/m (soit 30 kN/m à 3% de déformation). La géogrille utilisée est certifiée par le *British Board of Agreement (BBA)*, un organisme britannique qui fait référence sur les géogrilles de renfort. Grâce au certificat BBA, des données fiables et objectives sont accessibles afin d'évaluer l'adéquation des géogrilles avec chaque projet. Sur la base des facteurs de

réduction correspondant aux conditions du projet, une géogrid en PET gainé de PEHD, présentant une résistance de 150 kN/m a été installée sur le site.

Afin de mieux comprendre les mécanismes mis en jeu par la fonction stabilisation sur un milieu thixotrope, des essais de poinçonnement dynamique vont être réalisés au laboratoire INRAE d'Aix-en-Provence sur des boues rouges prélevées à Mange Garri avec le géocomposite de stabilisation utilisé.

4. Références bibliographiques

- AASHTO (2001). Geosynthetic reinforcement of the aggregate base course of flexible pavement structures – PP 46-01, *Standard specifications for transportation materials and methods of sampling and testing, 26th Edition, and Provisional standards*, American Association of State Transportation and Highway Officials, Washington, D.C.
- BS 8006-1: (2010) Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills, British Standards Institution, London
- Corbet S.P., Cazzuffi D. (2017). CEN/TC189 and ISO/TC 221 - European and international standards for geosynthetics: the current developments. *Proceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Seoul
- Giroud J.P., Han J. (2004a). Design method for geogrid-reinforced unpaved roads: I - Development of design method. *Journal of Geotechnical and geoenvironmental Engineering*, Vol. 130, No. 8, pp. 775-786.
- Giroud J.P., Han J. (2004b). Design method for geogrid-reinforced unpaved roads: II - Calibration and applications. *Journal of Geotechnical and geoenvironmental Engineering*, Vol. 130, No. 8, pp. 787-797.
- Leng J., Gabr M. (2002). Characteristics of geogrid-reinforced aggregate under cyclic load. *Journal of Transportation Research Board*, No. 1786, National Research Council, Washington, D.C., pp. 29-35.