

L'ESSAI CBR À CHARGEMENT RÉPÉTÉ : UN MOYEN SIMPLE ET EFFICACE POUR UNE CARACTÉRISATION RATIONNELLE DES GRAVES NON TRAITÉES

Abelaziz SALMI ^{*1}, Khaled LAHLOU², et Lahbib BOUSSHINE¹

¹ Université Hassan II, École Nationale Supérieure d'électricité et de Mécanique, Équipe Mécanique des structures et des Matériaux (MSM), Route El Jadida km 7, BP : 8118, Oasis, Casablanca, Maroc

²École Hassania des Travaux Publics, Équipe de Recherche en Ingénierie de la construction (ERIC), Route El Jadida Km 7, BP : 8108, Oasis, Casablanca, Maroc

Résumé

Les Graves Non Traitées (GNT) sont les matériaux les plus utilisés dans la construction des chaussées routières au Maroc. Leur comportement mécanique élastoplastique sous des charges répétées est complexe et dépend de plusieurs facteurs (densité, teneur en eau, granulométrie, état de contraintes... etc.). Cependant, dans le contexte marocain actuel la qualité mécanique de ces matériaux est principalement jugée sur la base de paramètres intrinsèques de granulats alors que la littérature internationale offre plusieurs essais pour étudier, au laboratoire, leur comportement mécanique à travers des essais de chargement. Le plus utilisé, à travers le monde, est l'essai triaxial à chargement répété. Toutefois, c'est un essai sophistiqué et loin d'être abordable par les laboratoires routiers au Maroc et dans les pays en voie de développement.

L'objectif de cette communication est de décrire un essai plus simple : l'essai CBR à Chargement Répété (CBR-CR), destiné à mesurer les paramètres nécessaires à un dimensionnement rationnel des chaussées souples. En effet, cet essai est une amélioration de l'essai CBR standard consistant à appliquer un chargement cyclique sur une éprouvette de GNT ou de sol pour mesurer sa rigidité et sa résistance à la déformation permanente. L'étude de l'influence de l'état de contrainte sur le comportement d'une GNA et d'une GNF2 en terme de rigidité et de résistance à la déformation permanente confirme la capacité de l'essai CBR-CR à évaluer les performances des matériaux non liés en vu de leur caractérisation.

Mots clés : Chaussée routière, graves non traitées, CBR à chargement répété, comportement mécanique, module équivalent.

1 Introduction

La caractérisation du comportement mécanique des GNT dans la pratique marocaine se base sur des essais empiriques de reconnaissance dont la validité est basée sur les expériences antérieures d'utilisation. De nos jours, les matériaux nobles répondant aux spécifications du catalogue marocain [1], sont de plus en plus rares dans pas mal de régions. Il est donc très opportun d'opter pour une caractérisation plus rationnelle permettant d'accéder directement aux paramètres de comportement mécanique des GNT telles la rigidité et la résistance à la déformation permanente. La méthode française de dimensionnement de chaussée détaillée dans [2] et actualisée dans la norme AFNOR [3] adopte des modules de rigidité croissants à partir du sol support jusqu'à la couche de roulement. Cette norme Considère trois catégories de GNT suivant les paramètres intrinsèques de caractérisation. Le calcul est mené en élasticité linéaire et si les déformations et/ou les contraintes dépassent les limites admissibles, on procède à un changement des épaisseurs et/ou les matériaux jusqu'à la satisfaction des critères de déformation et de contrainte.

Dans cette communication, les auteurs présentent l'essai CBR-CR comme un nouveau moyen de caractérisation des GNT avant de présenter les résultats d'une étude comparative d'une GNA avec une GNF2 au moyen dudit essai.

*Email de correspondance : abelaziz.salmi@ensem.ac.ma

2 Essai CBR-CR : Principe, Matériel utilisé et exploitation des résultats

L'essai CBR à chargement répété est un outil relativement simple pour la caractérisation du comportement résilient et de la résistance à la déformation permanente des GNT. Il consiste à enfoncer un poinçon à travers une éprouvette de sol ou de GNT comme dans l'essai CBR standard avec une vitesse d'enfoncement de 1.27 mm/min une charge maximale ; Ensuite l'éprouvette est déchargée à la même vitesse de chargement. La Figure 1 donne un exemple d'enregistrements de l'évolution de l'enfoncement du poinçon à travers une éprouvette de GNT lors de l'essai CBR-CR (cf, Figure 1.(A)), de l'évolution de la charge appliquée en fonction du temps (cf, Figure 1.(B)) ainsi que la courbe d'évolution de la charge en fonction de l'enfoncement du poinçon (cf, Figure 1.(C)). Grâce à sa simplicité, il est plus adapté au contexte technique et économique des pays en voie développement, relativement aux autres essais [4]. Il a été utilisé pour la caractérisation de nombreux sols tropicaux, et GNT provenant de plusieurs pays dans le cadre de la thèse de Araya [5]. Pour les matériaux dont le diamètre maximal des granulats est supérieur à 22.4 mm , Moleanar [6] recommande d'utiliser un moule plus large avec un diamètre au moins égale à 240 mm , pour les autres matériaux, le moule CBR conventionnel peut être utilisé sans précautions.

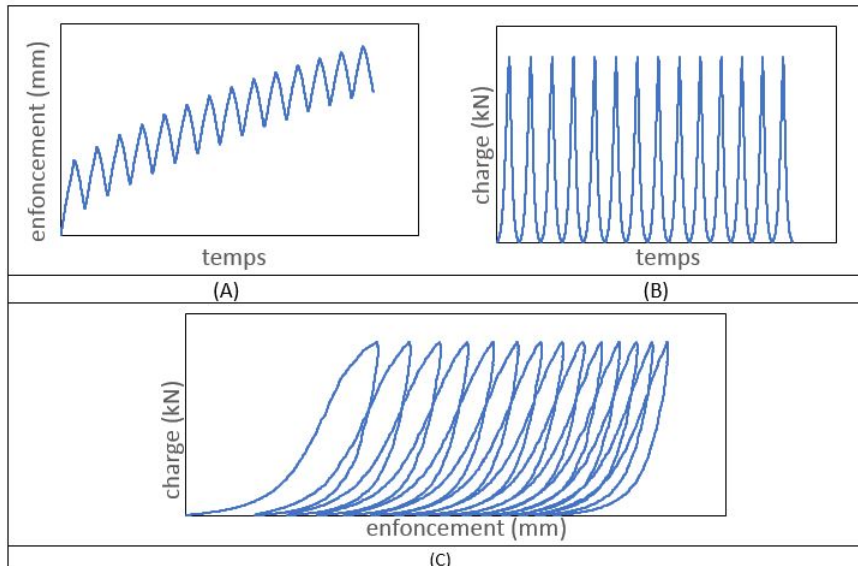


Figure 1 – Exemple d'enregistrement lors d'un essai CBR-CR

Le matériel nécessaire pour entreprendre l'essai CBR-CR est similaire à celui utilisé pour l'essai CBR standard. Pour un matériau dont le diamètre maximal des grains est inférieur à 20 mm , il est possible d'utiliser le moule CBR de diamètre $152 \pm 0.5 \text{ mm}$ et de hauteur $152 \pm 0.5 \text{ mm}$ avec le poinçon standard de diamètre 49.6 mm , (cf, Figure 2). La limitation du diamètre maximale de 20 mm est inspirée de la norme de l'essai CBR standard [7] et celle de l'essai Proctor [8]. Si le pourcentage du refus au tamis 20 est inférieur à 30%, la norme [7] prévoit l'écrtage de ce refus, et la conduite de l'essai CBR sur la fraction 0/20. Cette dernière opération revient à supposer que le comportement mécanique de la grave entière est équivalent à celui de sa fraction 0/20. Autrement dit le refus au tamis 20 mm n'a pas d'influence sur le comportement mécanique global du matériau. Pourtant, il est reporté dans l'article d'état d'art [9] que la rigidité des GNT est une fonction croissante de la dimension du plus gros élément. l'écrtage est donc à éviter.

Pour étudier des GNT de granulométrie 0/40 mm voire 0/60 mm sans écrtage de la fraction grossière, Moleanar [6] recommande d'utiliser un moule de diamètre 240 mm afin de rendre l'essai plus représentatif. Araya [5] ayant étudié le comportement mécanique de plusieurs matériaux granulaires, y-compris des graves 0/65 mm a utilisé un moule extra-large dont un schéma est présenté à la Figure 3.

Pour estimer le module de rigidité du matériau avec ce nouveau matériel, Araya [5] a suivi la même démarche

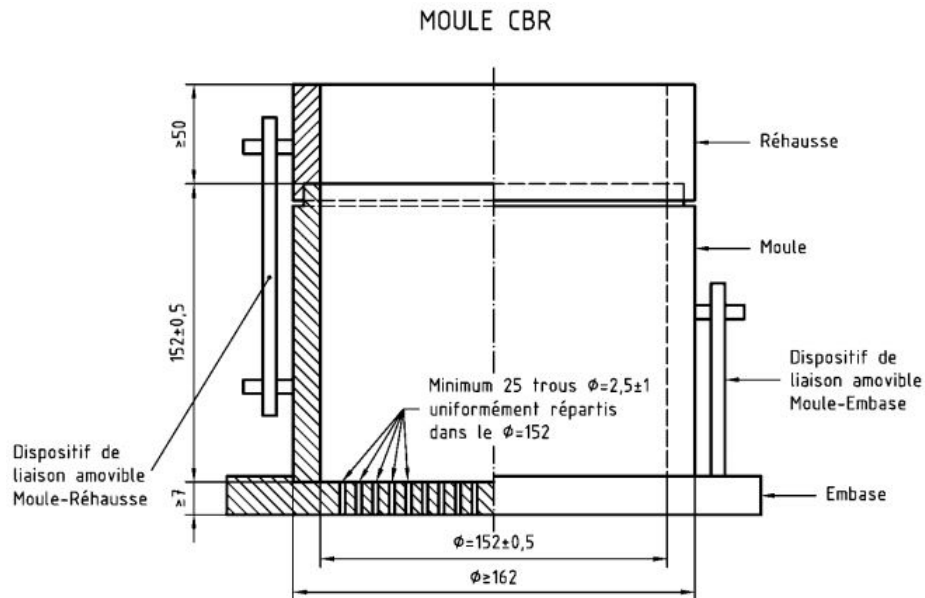


Figure 2 – Moule CBR standard [8]

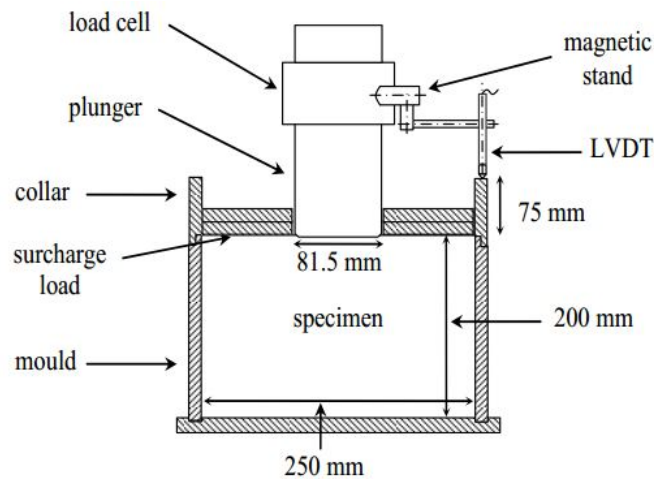


Figure 3 – Schéma du moule extra-large de l'essai CBR-CR [5]

de simulation proposée par Opiyo [10] aboutissant ainsi, à l'équation (2.1) permettant de calculer le module équivalent des GNT. En effet, Araya a qualifié ce module d'équivalent, au lieu de résilient, tenant compte de la non uniformité de l'état de contrainte à travers l'éprouvette.

Par ailleurs, L'essai CBR-CR peut être considéré comme un essai Triaxial dans lequel la contrainte de confinement n'est pas uniforme mais contrôlée par la contrainte sous le poinçon σ_p et la rigidité latérale du moule. Le moule peut être équipé avec des jauges de déformation [11]. Un calcul intermédiaire permet d'évaluer la contrainte verticale moyenne et la contrainte de confinement qui serviront pour évaluer le module et le coefficient de Poisson du matériaux étudié. L'essai CBR-CR est finalement transformé en essai triaxial pouvant être réalisé sur une presse universelle comme celle de l'EHTP (cf, Figure 4) utilisée dans ce projet de recherche. Il s'agit d'une presse électromécanique asservie de 300 kN de capacité.

$$E_{equ} = \frac{1.513 \times (1 - \nu^{1.104}) \times \Delta\sigma_p \times r}{\Delta u^{1.012}} \quad (2.1)$$

où :

- ν : Coefficient de Poisson du matériau
 $\Delta\sigma_p$: Contrainte réversible sous le poinçon (MPa)
 r : Rayon du poinçon ($r = 40.75 \text{ mm}$)
 Δu : Enfoncement réversible du poinçon (mm)

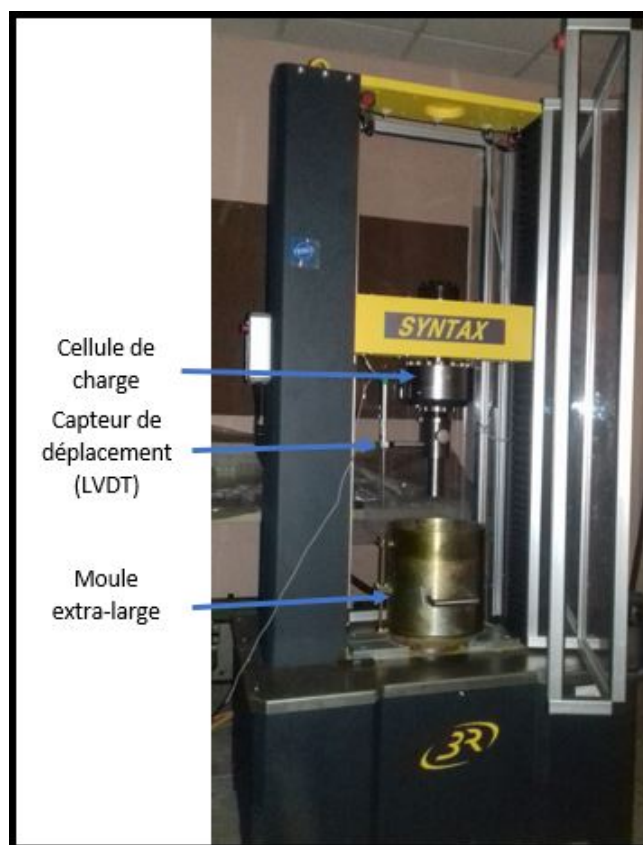


Figure 4 – Presse électromécanique de l'EHTP

3 Caractérisation expérimentale de deux GNT

3.1 Démarche expérimentale

Dans cette section, sont présentés les résultats de l'étude de deux GNT par l'essai CBR-CR : une grave issue de Bouskoura notée G-BS et une grave de Tit Mellil notée G-TM. Pour chaque éprouvette, deux séquences de chargement identiques sont appliquées sur chacune des deux faces. Chaque séquence compte 8 paliers de chargement de 14 cycles de charge-décharge, ce nombre de cycle était suffisant pour la stabilisation des enfoncement permanents pour les graves étudiées, dont l'incrément par cycle devient inférieur à 6 % de l'enfoncement réversible au 14^{ème} cycle. Les valeurs de la charge maximale et de la contrainte réversible correspondante à chaque palier sont données au Tableau 1. La charge minimale est fixée à 0.3 kN afin de maintenir un contact permanent entre le poinçon et l'éprouvette. Les éprouvettes sont confectionnées à la teneur en eau de l'optimum Proctor modifié et compactées en trois couches à l'aide d'un compacteur vibrant à 98% de la densité maximale obtenue par l'essai Proctor modifié.

3.2 Identification des deux graves étudiées

La Figure 5 présente les courbes granulométriques de G-BS et G-TM, ainsi que les fuseaux de spécification d'une GNA (0/31,5) et d'une GNF2 (0/40). Les deux courbes s'insèrent respectivement à l'intérieur des deux

Tableau 1 – Paramètres de charge pour les 8 paliers utilisés

Palier	1	2	3	4	5	6	7	8
Charge maxi F_{max} (KN)	2.80	5.30	10.30	20.30	30.30	40.30	50.30	60.30
Contrainte $\Delta\sigma_p$ (MPa)	0.48	0.96	1.92	3.83	5.75	7.67	9.58	11.50

fuseaux réglementaires. Le Tableau 2 regroupe les caractéristiques mécaniques et de propreté des deux graves étudiées avec les spécifications concernant les graves GNA et GNF2.

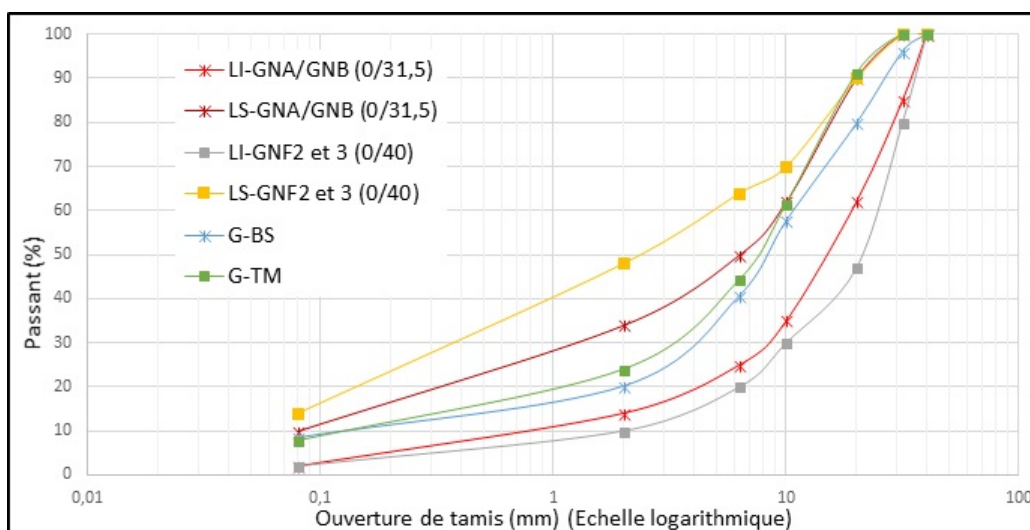


Figure 5 – Courbes granulométriques des deux graves G-Bs et G-TM

Tableau 2 – Caractéristiques mécaniques et de propreté de G-BS et G-TM avec les seuils de spécification des GNA et GNF2

	Dureté		Propreté	
	L_A (%)	M_{DE} (%)	IP	ES (0/5)(%)
Spécifications GNA	< 30	< 20 (hors zone d)	–	> 30
Spécifications GNF2	<40	< 35 (hors zone d)	< 8 ou 12 (zone d)	–
G-BS	21	10	–	42
G-TM	26	15	9.75	–

En plus des résultats de l'analyse granulométrique, la comparaison des paramètres de résistance et de propreté des graves étudiées et les seuils de référence d'une GNA et d'une GNF2 dans le sens du catalogue [1], on conclut que G-BS et G-TM sont respectivement, une GNA et une GNF2.

Les paramètres de référence de compactage des deux graves sont déterminés par l'essai Proctor Modifié. Les deux courbes de compactage sont présentées à la Figure 6. La courbe de compactage de G-BS est ordinaire et les paramètres de référence sont les coordonnées de son extrémité. Mais, pour G-TM, il s'agit d'un Proctor de ressuage où la densité, après une stabilisation locale, ne cesse de croître. Dans ce cas, le couple de paramètres de référence de compactage est constitué par les coordonnées du point d'inflexion de la courbe de compactage. Les paramètres de référence de compactage des graves étudiées sont récapitulés au (Tableau 3).

3.3 Résultats et discussion

La Figure 7 présente l'évolution du module équivalent avec la contrainte réversible sous le poinçon pour G-BS et G-TM. Pour chaque séquence, le module correspondant à un palier est la moyenne des deux valeurs obtenues

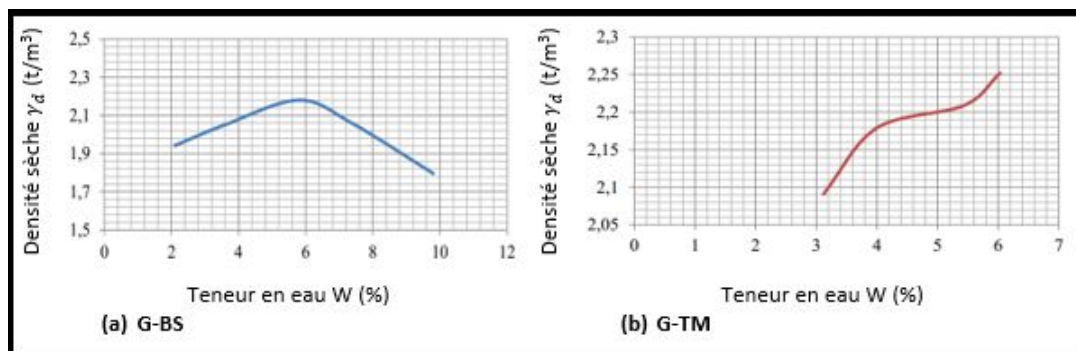


Figure 6 – Courbes Proctor modifié des matériaux étudiés

Tableau 3 – Paramètres de référence de compactage des de G-BS et G-TM

	$W_{OPM}(\%)$	$\gamma_{OPM}(t/m^3)$
G-BS	5.8	2.18
G-TM	4.7	2.19

sur les deux faces. L'augmentation des modules moyen avec la contrainte réversible pour les deux séquences et les deux matériaux est bien notable, en plus les modules obtenus pour G-BS sont légèrement supérieurs à ceux de la G-TM en particulier pour les contraintes élevées. ce résultat était prévisible puisque G-BS est une GNA alors que G-TM est une GNF2. En outre, la deuxième séquence présente des modules plus élevés par rapport à la première pour les deux matériaux. Cette amélioration des modules est due à la densification du matériau sous l'effet de la séquence antérieure de chargement.

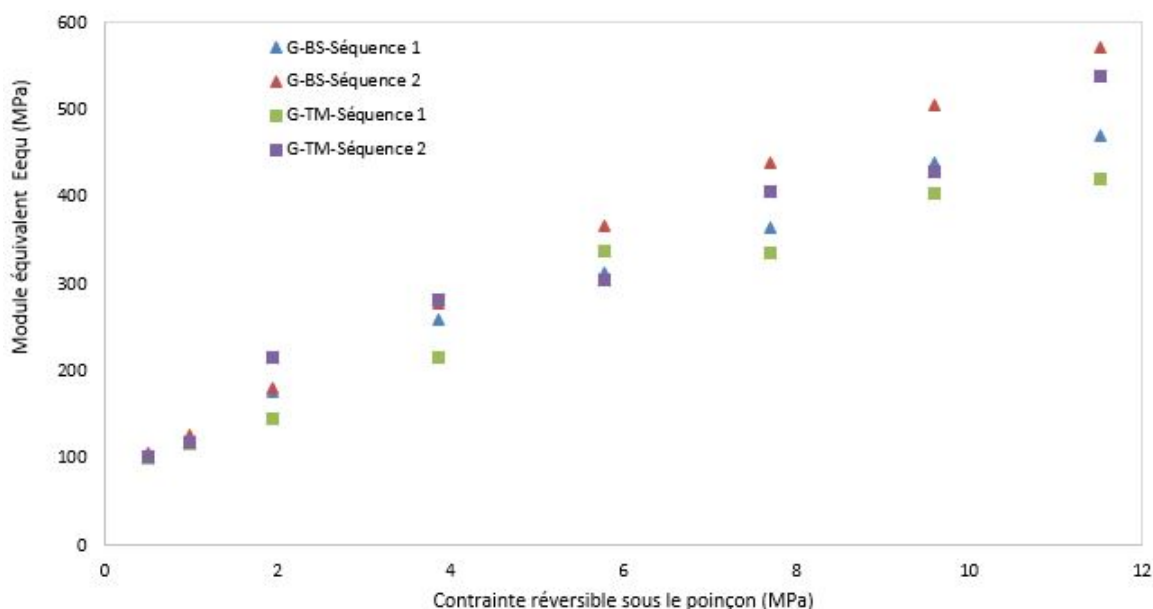


Figure 7 – Module équivalent Vs la contrainte réversible sous le poinçon

Pour mener une analyse globale de l'influence de la contrainte sur la rigidité des matériaux étudiés, On a considéré la valeur moyenne des modules obtenus lors des quatre séquences de chargement pour chaque éprouvette. La Figure 8 montre que les modules équivalents moyens évoluent de façon presque linéaire avec la contrainte réversible sous le poinçon. En effet, la régression linéaire de la courbe Module équivalent-Contrainte est très bonne avec coefficient de corrélation de $R^2 = 0.990$ pour G-BS suivant l'équation (3.1) et de $R^2 = 0.986$

pour G-TM suivant l'équation (3.2). Remarquons que ces équations sont relatives aux matériaux étudiés, au niveau de compactage et à la teneur en eau des éprouvettes. Ainsi, toute extrapolation de ces équations en dehors de ces conditions nécessite une validation préalable. Il faut noter encore, que le module de G-TM était inférieur à celui de G-BS pour les différents paliers. En effet, sa valeur moyenne sur les huit paliers est de l'ordre de 280MPa pour la GNF2 de 300MPa pour la GNA, soit un écart de 14%.

$$E_{equ} = 38\Delta\sigma_p + 103 ; R^2 = 0.990 \quad (3.1)$$

$$E_{equ} = 34\Delta\sigma_p + 105 ; R^2 = 0.986 \quad (3.2)$$

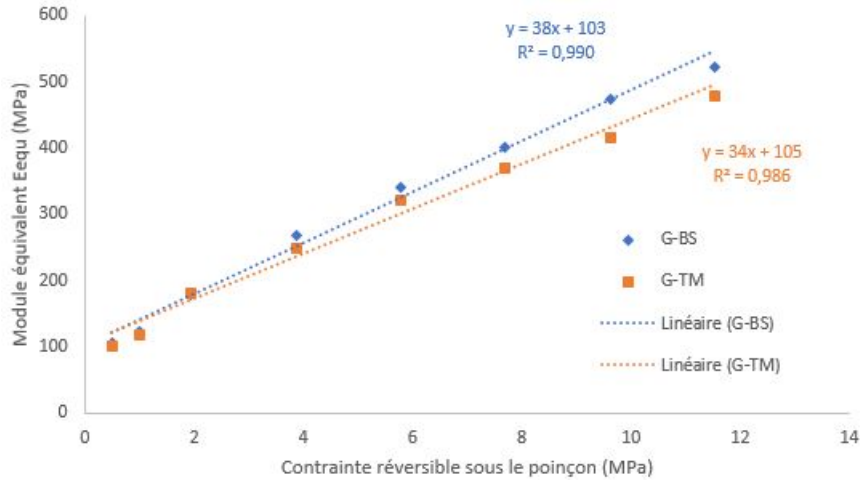


Figure 8 – Modules équivalents moyens Vs contrainte réversible sous le poinçon

Les résultats concernant le comportement réversible révèlent que les deux graves présentent des rigidités semblables, au moins pour les niveaux de compactage et de teneur en eau considérés. Mais, pour une comparaison plus complète, la résistance à la déformation permanente des deux graves devra être considérée. En effet, une bonne GNT doit être rigide mais aussi, résistante à la déformation permanente. Dans la littérature, c'est l'essai triaxial à chargement répété avec des milliers voir des millions de cycles qui est utilisé [12]. Toutefois, en tenant compte du fait que l'objectif n'est pas de mener une caractérisation fondamentale, mais plutôt une évaluation rationnelle et économique des performances des GNT avec le matériel disponible, les résultats de l'essai CBR-CR en terme d'enfoncement permanent peuvent être utilisés pour exprimer la résistance des matériaux testés à la déformation permanente. Le graphe des enfoncements permanents moyens obtenus pour les deux NT étudiées sont représentés à la Figure 9. On constate que G-TM présente des enfoncements permanents plus prononcés que G-BS, en particulier après le troisième palier où un écart moyen de 36% est enregistré ce qui montre que la GNA (G-BS) est plus résistante à la déformation permanente que la GNF2 (G-TM).

4 Conclusions et perspectives

Dans cette communication, un nouvel essai d'étude du comportement mécanique des GNT est présenté ; le CBR-CR de sa version initiale avec un seul palier de chargement à sa version évoluée avec des paliers multiples. Cet essai est proposé pour détourner les difficultés techniques et économiques que posent l'essai triaxial à chargement répété. L'utilisation du moule extra-large permet de contourner la contrainte d'écralement qu'impose l'utilisation du moule CBR standard et rend l'essai plus compétitif par rapport au TCR. Mais, pour une utilisation plus fondamentale, l'introduction de jauges de déformation latérales sur le moule de l'essai CBR-CR permet de convertir l'essai CBR-CR en un TCR particulier.

L'étude d'une GNA issue de Bouskoura et d'une GNF2 issue de Tit Mellil au moyen de l'essai CBR-CR par paliers a permis de relever que la GNA est légèrement plus rigide que la GNF2. En effet le module équivalent moyen sur les huit paliers est de l'ordre de 280MPa pour la GNF2 et de 300MPa pour la GNA, soit un écart

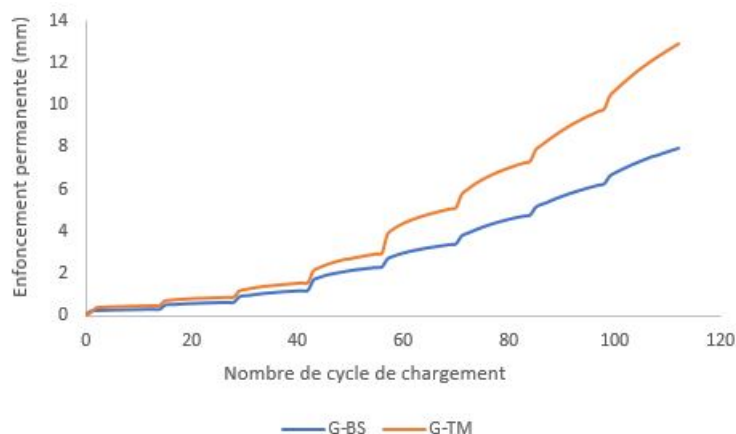


Figure 9 – Enfoncements permanents Vs nombre de cycles pour G-BS et G-TM

de 14%. Par ailleurs, ce nouvel essai a permis de montrer que cette GNA est plus résistante à la déformation permanente que la GNF2 avec un écart de 36%. En plus, l'essai CBR-CR par palier a confirmé que les module des GNT augmentent avec l'état de contrainte.

Cet étude a permis donc de valider la capacité de l'essai CBR-CR pour :

- Étudier l'influence de l'état de contrainte sur la rigidité des GNT : Croissance de la rigidité avec le niveau de contrainte ;
- Comparer les graves non traitées en terme de leurs performances mécaniques rationnelles : Rigidité et résistance à la déformation permanente.

Des essais complémentaires sur des matériaux de différentes qualités et origines sont prévus dans le cadre de ce travail de recherche afin de mieux valider la pertinence de ce nouvel essai contradictoirement avec le TCR de référence.

Références

- [1] DRCCR. Catalogue des structures types de chaussées neuves, Maroc, 1995.
- [2] SETRA and LCPC. Conception et dimensionnement des structures de chaussée, Guide technique, 1994.
- [3] AFNOR. NF P 98-086- Dimensionnement structurel des chaussées routières- Application aux chaussées neuves, October 2011.
- [4] Abdelaziz Salmi, Khaled Lahlou, and Lahbib Bousshine. Literature review : Laboratory characterization tests of unbound materials for pavement construction. In *International Conference on Civil Engineering and Materials (ICCEM'2017)*, ENSA, Al Hoceima, Morocco, 2017.
- [5] Alemgena Alene Araya. *Characterization of Unbound Granular Materials for Pavements*. PhD thesis, Delft University of Technology, the Netherlands, 2011.
- [6] A. A. A. Molenaar. Repeated load CBR testing, a simple but effective tool for the characterization of fine soils and unbound materials. In *TRB 2008 Annual Meeting CD ROM, Delft University of Technology, Netherlands*, 2008.
- [7] AFNOR. NF-P94-078-Sols :Reconnaissance et essais : Indice CBR après immersion- Indice CBR Immédiat-Indice Portant Immédiat, 1997.

- [8] AFNOR. NF P 94-093-Sols : Reconnaissance et essais, Détermination des références de compactage d'un matériau-Essai Proctor normal- Essai Proctor modifié, 1999.
- [9] Fredrick Lekarp, Ulf Isacsson, and Andrew Dawson. State of art. I : Resilient response of unbound aggregates. *Journal of Transportation Engineering*, pages 66–75, 2000.
- [10] T. O. Opiyo. A mechanistic approach to Laterite-based pavements in transport and road engineering. Master's thesis, International Institute for Infrastructure, Hydraulics and Environment Engineering, Delft, The Netherlands, 1995.
- [11] A.A. Araya, M. Huurman, A.A.A. Molenaar, and L.J.M. Houben. Investigation of the resilient behavior of granular base materials with simple test apparatus. *Materials and Structures*, 45(5) :695–705, 2012.
- [12] Mohammad Shafiqur Rahman and Sigurdur Erlingsson. Modelling the Moisture Dependent Permanent Deformation Behavior of Unbound Granular Materials. *Procedia Engineering*, 143 :921–928, 2016.

Remerciement :

Au titre de ce travail, nous tenons à remercier :

- ☐ *L'académie Hassan II des sciences et techniques pour l'octroie d'une bourse d'excellence au premier auteur en tant que lauréat du Concours Général des Sciences et Techniques (CGST),*
- ☐ *Le CERIT du LPEE pour leur appui à ce projet de recherche,*
- ☐ *Mme Hayat GOUGNI et Mme Hafsa ADOUS, Ingénieurs de l'EHTP pour leur contribution à la partie expérimentale de ce travail.*
- ☐ *Mme Essaadia AZELMAD Pour la relecture du manuscrit.*