

Évaluation des déformations permanentes des graves non traitées de chaussées souples sous chargement cyclique par palier

Makhaly BA^{1*}, Oustasse Abdoulaye SALL² et Ibrahima DIATTA²

¹ Université de Thiès, Département de Géotechnique, UFR Sciences de l'Ingénieur, BP 960 Thiès, Sénégal

² Université de Thiès, Département de Génie Civil, UFR Sciences de l'Ingénieur, BP 960 Thiès, Sénégal

* Correspondance, courriel : makhaly.ba@univ-thies.sn

Résumé

Ce travail porte sur l'étude de l'évolution des déformations permanentes de matériaux routiers granulaires sous sollicitations cycliques, représentant le trafic routier. Pour ce faire, deux Graves Non Traitées (GNT) utilisées en couche d'assise de chaussée ont été préparées en laboratoire et ont fait l'objet d'essais de déformations permanentes par palier. Chaque palier correspond à l'application de 10 000 cycles de chargement selon un niveau de contrainte donné en utilisant l'appareil Triaxial à Chargement Répété (TCR). Les résultats montrent que les déformations permanentes augmentent très rapidement lors des premiers cycles de chargements. Cette phase est suivie d'une stabilisation progressive des déformations, d'autant plus marquée que le niveau de contrainte appliqué est faible. Les déformations permanentes en fin de palier (après 10 000 cycles de sollicitations) sont proportionnelles à la contrainte moyenne (p) et au niveau de contrainte (rapport q/p). Lorsque le niveau de contrainte q/p est relativement faible, les déformations permanentes se stabilisent pour tendre vers un état d'équilibre. Par contre, les niveaux de contrainte élevés entraînent un collapse progressif de la GNT. Il y a donc un niveau de contrainte limite qui sépare la phase d'équilibre de la phase de collapse progressif du matériau. Un bon dimensionnement des chaussées souples passe donc nécessairement par une bonne prédiction de l'évolution des déformations permanentes en fonction du niveau de contrainte et du nombre de cycle de chargement. Cette évolution permet de prédire l'orniérage qui est le principal mode de dégradation des matériaux routiers non liés.

Mots-clés : *déformations permanentes, graves non traitées, chargement cyclique par palier, niveau de contrainte, contrainte moyenne.*

Abstract

Permanent deformations assessment of unbound granular materials for flexible pavements under multi-stage cyclic loading

This research deals with the permanent deformations assessment of granular road materials under cyclic loading, representing road traffic. To do this, two Unbound Granular Materials (UGM) used as pavement layer were prepared in laboratory and subjected to multi-stage permanent deformation tests. Each stage corresponds to the application of 10,000 load cycles according to a given stress level using the Repeated Load Triaxial (RLT) apparatus. The results show that the permanent deformations increase very rapidly during the first cycles of loading. This phase is followed by a progressive stabilization of the deformations, all the more marked

as the stress level applied is low. The permanent deformations at the end of stage (after 10,000 stress cycles) are proportional to the mean stress (p) and the stress level (q/p ratio). When the stress level is relatively low, the permanent deformations stabilize and tend towards a state of equilibrium. On the other hand, the high levels of stress cause a progressive collapse of the UGM. So there is a limit stress level that separates the equilibrium phase from the phase of progressive collapse of the material. Good structural design of flexible pavements therefore necessarily involves a good prediction of the permanent deformations as a function of the stress level and the number of loading cycles. This evolution makes it possible to predict rutting which is the main mode of degradation of unbound road materials.

Keywords : *permanent deformations, unbound granular materials, multi-stage cyclic loading, stress level, mean stress.*

1. Introduction

Les couches de base et de fondation des chaussées souples sont généralement constituées de matériaux granulaires non liés ou Graves Non Traitées (GNT). En participant à la diffusion des contraintes dues au chargement routier, ces couches jouent un rôle essentiel dans la performance structurelle globale de la chaussée. Les caractéristiques matérielles des couches non liées ont donc une grande importance pour la performance de la structure. L'orniérage constitue un des principaux modes de dégradation des chaussées souples. Il est dû essentiellement au cumul des déformations plastiques dans les différentes couches de graves non traitées, sous chargement répété du trafic [1, 2]. L'orniérage des chaussées souples est matérialisé par des déformations permanentes de grand rayon au niveau des deux empreintes de passage des roues d'un poids lourd. Ces déformations sont accompagnées de bombements de part et d'autres, modifiant ainsi le profil transversal et donc le bon drainage de la chaussée. Cette accumulation des déformations dépend essentiellement de la structure de la chaussée (épaisseur et qualité des matériaux), du trafic et des conditions environnementales [3, 4]. À long terme, la chaussée doit être capable de résister aux déformations permanentes. Cependant, la méthode actuelle de dimensionnement des routes au Sénégal et dans la majorité des pays de l'Afrique de l'ouest associe l'orniérage à une déformation verticale élastique excessive au sommet de la plate-forme [5, 6].

Elle suppose que si la chaussée est bien dimensionnée, la qualité des matériaux bien contrôlée et la mise en œuvre bien effectuée, l'orniérage pourrait être limité à une valeur admissible en limitant seulement la déformation élastique verticale au sommet de la plate-forme [5]. Ce critère est critiquable du fait qu'il tient compte uniquement des déformations élastiques, et que le type de sollicitation est statique et non cyclique. En plus, il ne tient pas compte des caractéristiques du matériau car il apparaît clairement que la déformation permanente totale d'une chaussée résulte de la somme des déformations permanentes qui se sont accumulées dans les différentes couches de la chaussée [7 - 10]. L'objectif de cette recherche est d'étudier l'évolution des déformations permanentes des GNT en fonction du nombre de cycles et du niveau de contrainte appliqués. La procédure utilisées dans le cadre de cette étude est l'approche française développée au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) de France. Elle consiste à appliquer sans conditionnement plusieurs milliers de cycles de chargement suivant un chemin de contrainte bien défini. Cette approche est sommaire et permet de mettre en évidence l'effet du niveau de contrainte [1, 8] sur les déformations. Pour étudier le comportement irréversible, la procédure *Ja* du « *National Cooperative Highway Research Program* » (NCHRP) [11] a été modifiée pour proposer les séquences de chargement à appliquer sur les échantillons de graves non traitées [3, 6].

2. Matériel et méthodes

2-1. Programme expérimental

Deux Graves Non Traitées (GNT) habituellement utilisées en construction routière ont été étudiées. Il s'agit des basaltes (BAS 0/31,5) et des quartzites (GNB 0/31,5) de granularité 0/31,5. Sur chaque matériau, 4 tests de déformation permanente sont réalisés, chaque test comportant 3 paliers de chargement selon les taux de cisaillement $q/p = 0,75, 1,2, 1,5$ et $1,87$. Les valeurs de q et de p sont données respectivement par les **Équations (1) et (2)**.

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 \tag{1}$$

$$p = \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{3} \tag{2}$$

Pour chaque palier, le nombre de cycles de chargement est de 10 000 cycles. Les éprouvettes de quartzites et de basalte sont compactées à 98 % de la masse volumique sèche maximale du Proctor modifié. Les échantillons sont compactés à la teneur en eau optimale moins 2 %. Les caractéristiques physiques et le programme expérimental pour l'étude des déformations permanentes sont résumés dans le **Tableau 1**.

Tableau 1 : Quelques caractéristiques physiques et programme des essais effectués sur deux (02) matériaux (GNB 0/31,5 et basalte) pour l'étude du comportement irréversible

Matériaux	ρ_{dmax} (kg/m ³)	W_{opt} (%)	W_{nat} (%)	Étude des déformations permanentes
GNB 0/31,5	2150	4,5	$W_{opt} - 2$	12 essais à paliers de 10 000 cycles
Basalte 0/31,5	2420	4,2	$W_{opt} - 2$	12 essais à paliers de 10 000 cycles

2-2. Procédure NCHRP Ia, modifiée

Elle est essentiellement basée sur les travaux de [1], qui a effectué sur une grave dioritique des essais triaxiaux, à un et cinq paliers. Il a montré que lorsque le rapport q/p reste constant tout au long de l'essai, l'effet de l'histoire des contraintes est éliminé et que les déformations permanentes axiales et radiales tendent vers la même valeur finale (**Figure 1**). De ce fait, une même éprouvette peut être utilisée pour appliquer plusieurs séquences de chargement, pourvu que le rapport q/p soit constant.

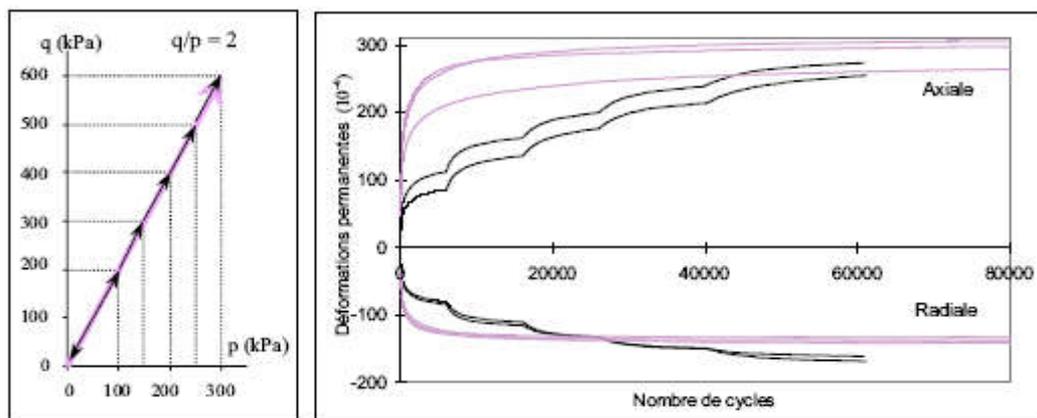


Figure 1 : Mise en évidence de la non influence de l'histoire du chargement quand q/p reste constant [1]

Dans cette étude, nous avons modifié la procédure *la* du NCHRP ([11]) pour avoir les différentes séquences appliquées aux échantillons. Elle consiste à appliquer les 12 séquences de chargement du **Tableau 2** correspondant à des chemins de contraintes variant entre 0,75 et 1,87, et en utilisant l'appareil triaxial à chargement répété (**Figure 2**). Chaque séquence est appliquée pour 10 000 cycles. Le chargement a une forme triangulaire (*ou log normale*) de durée 0,1 seconde, suivie d'une période de repos de 0,9 seconde. Pour chaque rapport de contrainte q/p , trois paliers de chargement, correspondant à trois états de contrainte différents, sont appliqués sur le même échantillon. La déformation permanente est mesurée à chaque cycle de chargement. Cette procédure a l'avantage de réduire la dispersion expérimentale et d'étudier l'effet de l'état des contraintes en utilisant une seule et même éprouvette [1, 3, 12].

Tableau 2 : Procédure *la* : Séquences de chargement utilisées pour étudier les déformations permanentes

q/p	Palier N°	Contrainte de confinement (kPa)	Contrainte de contact (kPa)	Contrainte cyclique (kPa)	Contrainte maximale (kPa)	Nombre de répétitions
0,75	1	20,7	4,1	20,7	24,8	10 000
	2	41,4	8,3	41,4	49,7	10 000
	3	69,0	13,8	69,0	82,8	10 000
1,2	1	20,7	4,1	41,4	45,5	10 000
	2	41,4	8,3	82,8	91,1	10 000
	3	69,0	13,8	138,0	151,8	10 000
1,5	1	20,7	4,1	62,1	66,2	10 000
	2	41,4	8,3	124,2	132,5	10 000
	3	69,0	13,8	207,0	220,8	10 000
1,87	1	20,7	4,1	103,5	107,6	10 000
	2	41,4	8,3	207,0	215,3	10 000
	3	69,0	13,8	345,0	358,8	10 000



Figure 2 : Cellule triaxiale de l'Université de Wisconsin-Madison (Etats-Unis d'Amérique)

3. Résultats et discussion

3-1. Évolution des déformations permanentes en fonction du nombre de cycles

Les **Figures 3 et 4** présentent les résultats expérimentaux des essais effectués sur le GNB 0/31,5 et le Basalte 0/31,5. La déformation permanente (ϵ_p) correspond à la déformation irrécupérable du matériau qui

va s'accumuler avec l'application répétée des chargements. L'analyse des résultats montre que l'évolution des déformations permanentes est caractérisée par une augmentation rapide lors des premiers cycles de chargements. Cette phase est suivie d'une stabilisation progressive des déformations. La stabilisation est plus importante aux faibles niveaux de contrainte appliqués. Par contre, lorsque le niveau de contrainte est très élevé, les déformations permanentes ne se stabilisent pas. Pour un rapport de contrainte q/p donné, les déformations permanentes augmentent avec l'augmentation de la contrainte déviatorique cyclique, ceci malgré une augmentation simultanée de la contrainte de confinement. Cela démontre le rôle prépondérant que joue la contrainte déviatorique sur l'évolution des déformations permanentes et donc de l'orniérage des chaussées souples.

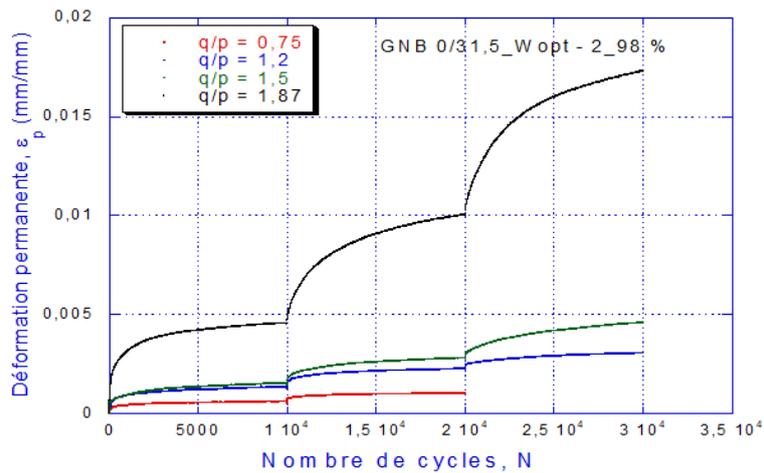


Figure 3 : *Évolution de la déformation permanente axiale en fonction du nombre de cycles de chargements et du rapport de contraintes q/p (GNB 0/31,5)*

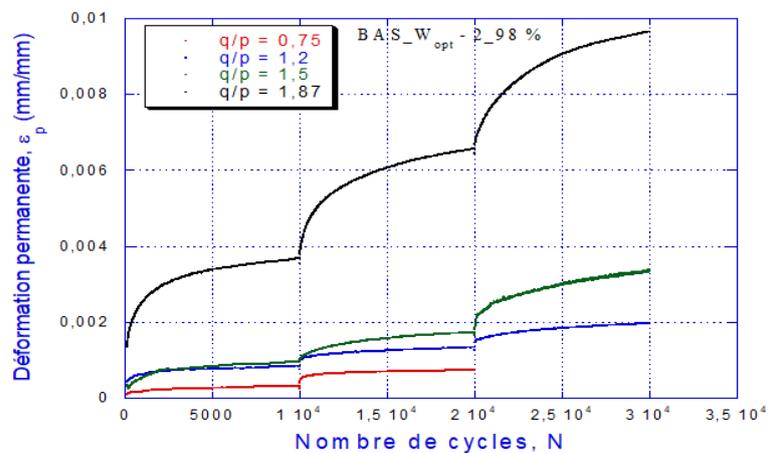


Figure 4 : *Évolution de la déformation permanente axiale en fonction du nombre de cycles de chargements et du rapport de contraintes q/p (Basalte 0/31,5)*

3-2. Effet de la contrainte moyenne et du rapport q/p

Les **Figures 5 et 6** donnent l'évolution de la déformation permanente axiale en fin de palier en fonction de la contrainte moyenne (p), pour différents rapports de contrainte (q/p). Les déformations permanentes augmentent lorsque le rapport de contrainte augmente. Ces déformations permanentes en fin de palier sont proportionnelles à la contrainte moyenne appliquée. Une relation linéaire semble exister entre ces déformations permanentes et la contrainte moyenne avec une augmentation de la pente de cette relation avec l'augmentation de la contrainte moyenne.

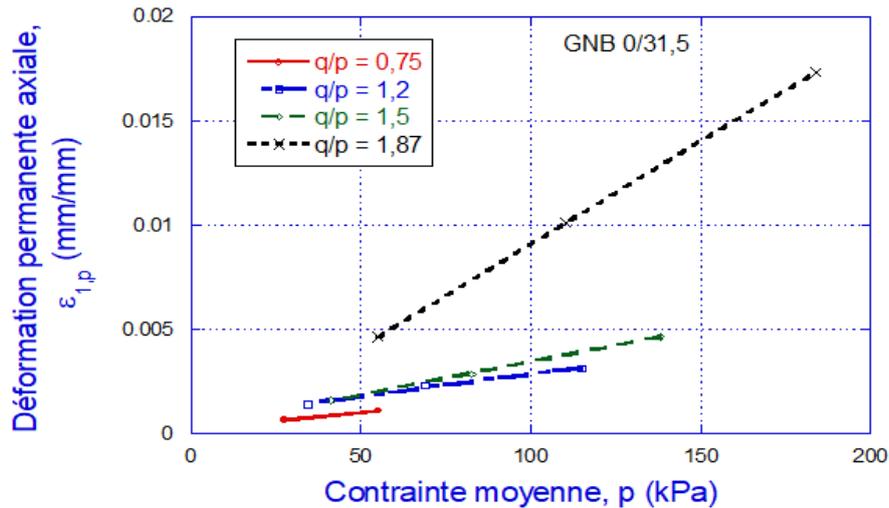


Figure 5 : Évolution des déformations permanentes axiales en fin de palier en fonction de la pression moyenne (GNB 0/31,5)

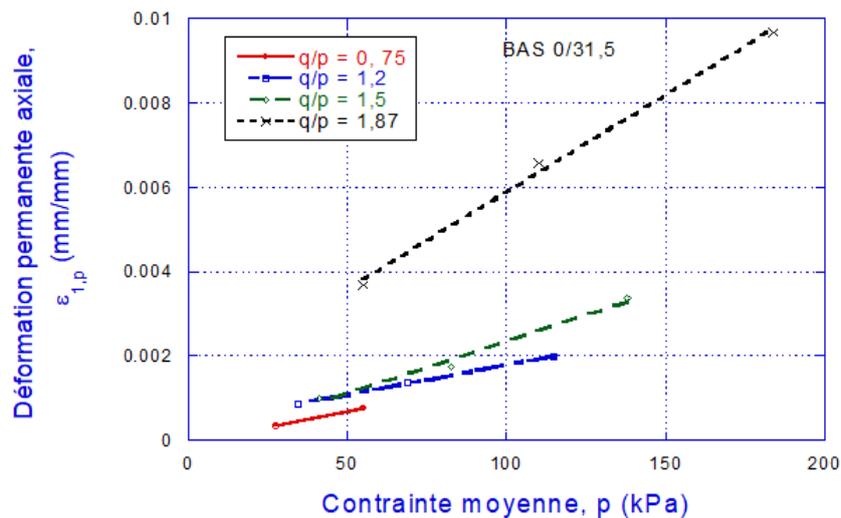


Figure 6 : Évolution des déformations permanentes axiales en fin de palier en fonction de la pression moyenne (Basalte 0/31,5)

Les **Figures 7 et 8** donnent l'évolution de la déformation permanente axiale en fin de palier en fonction du rapport de contrainte (q/p). Le niveau de déformation permanente augmente de manière asymptotique et montre deux types d'évolution. Lorsque le niveau de contrainte q/p est relativement faible, les déformations permanentes se stabilisent pour tendre vers un état d'équilibre. Par contre, les niveaux de contrainte élevés entraînent un collapse progressif de la GNT. Il y a donc un niveau de contrainte limite qui sépare la phase d'équilibre de la phase de collapse progressif du matériau [13].

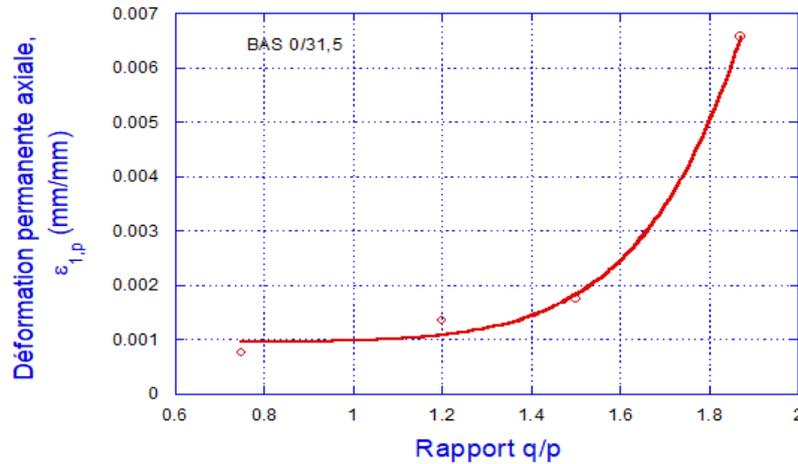


Figure 7 : Évolution de la déformation permanente axiale en fin de palier en fonction rapport q/p (Basalte 0/31,5)

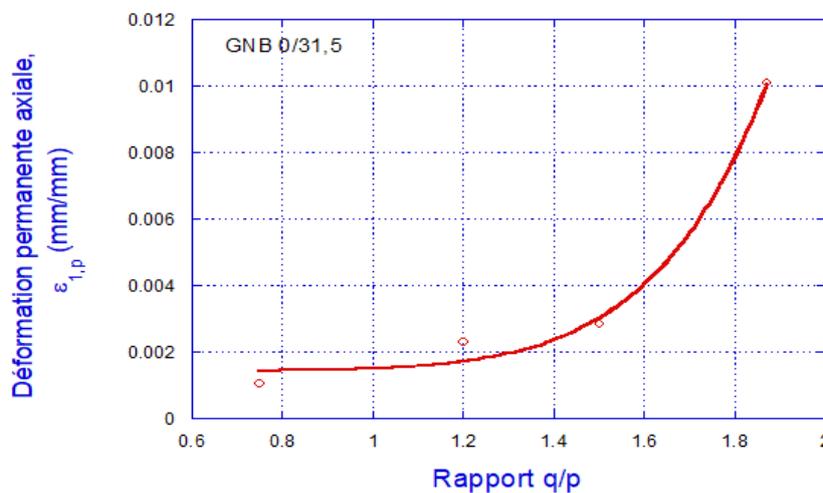


Figure 8 : Évolution de la déformation permanente axiale en fin de palier en fonction rapport q/p (GNB 0/31,5)

3-3. Discussion

Les GNT utilisées dans les couches d'assise possèdent un comportement élastoplastique non linéaire complexe. La déformation totale lors d'un cycle de chargement/déchargement comprend deux composantes : une déformation réversible ou résiliente et une déformation permanente ou plastique. Le nombre de cycles de chargement est l'un des facteurs les plus importants dans l'analyse du comportement à long terme des matériaux granulaires. En effet, sous chargements répétés, chaque charge appliquée apporte un petit incrément de déformation plastique. Plusieurs chercheurs ont ainsi étudié l'importance du nombre de cycles de chargement sur l'évolution des déformations permanentes [14, 15]. Plusieurs modèles d'évolution de la déformation permanente sont proposés pour étudier l'influence du nombre de cycles sur le développement des déformations permanentes [16 - 19]. Dans le cas d'essais par palier, Hornyh [20, 21] propose une approche qui exprime la déformation permanente après 100 cycles de chargements en fonction du nombre de cycles par l'Équation (3).

$$\varepsilon_{1,p}^* = \varepsilon_1^p(N) - \varepsilon_1^p(100) = A \cdot \left(1 - \left(\frac{N}{100} \right)^{-B} \right) \quad (3)$$

où $\varepsilon_{1,p}^*$ est la déformation permanente axiale additionnelle après les 100 premiers cycles ; A et B sont les paramètres du modèle.

Dans cette équation, $\varepsilon_{1,p}^*$ tend vers une valeur limite (A) quand N augmente et tend vers l'infinie. Cette **Équation** ne s'applique donc qu'aux paliers avec stabilisation des déformations permanentes. Cependant, les résultats (**Figures 3 et 4**) montrent que la stabilisation est essentiellement fonction du niveau de contrainte appliquée. Le niveau de contrainte est ainsi l'un des facteurs les plus importants affectant le développement des déformations permanentes dans les matériaux granulaires. A contrainte de confinement constante, les déformations permanentes axiales sont directement proportionnelles à la contrainte déviatorique (q). Par contre, à contrainte déviatorique constante, la déformation permanente axiale est inversement proportionnelle à la pression de confinement. Ainsi, les déformations permanentes des matériaux granulaires dépendent principalement du rapport entre la contrainte déviatorique et la contrainte de confinement [13, 14, 22]. Les **Figures 5 à 8** montrent que lors des essais triaxiaux à chargement répété, les faibles niveaux de cisaillement conduisent à des déformations permanentes qui se stabilisent avec le nombre de cycles jusqu'à ce que le comportement devienne réversible. Cependant, lorsque le taux de cisaillement est élevé, les déformations permanentes s'accroissent jusqu'à la rupture éventuelle de l'échantillon. Ceci montre l'importance de maintenir un rapport de contrainte relativement bas dans les chaussées souples afin de limiter les dégradations par ornièrage. La comparaison entre les deux GNT étudiées montre que le basalte de Diack résiste mieux à l'ornièrage que le quartzite de Bakel. Cependant, les deux matériaux testés offrent de bonnes résistances à l'ornièrage avec des valeurs de déformation permanente inférieures à 2 %.

4. Conclusion

Dans ce travail, l'influence du niveau de contrainte sur les déformations permanentes a été étudiée à travers des essais de chargement cyclique par palier effectués sur des échantillons de graves non traitées préparés en laboratoire. La procédure de l'essai de chargement par palier élaborée par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) devenu aujourd'hui l'Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR). Elle a l'avantage de réduire la dispersion expérimentale et d'étudier l'effet de l'état des contraintes en utilisant une seule et même éprouvette. Les résultats démontrent le rôle prépondérant que jouent les contraintes sur l'évolution des déformations permanentes et donc de l'ornièrage des chaussées souples. Les déformations permanentes en fin de paliers sont corrélées positivement à la contrainte moyenne (p) et au niveau de contrainte (q/p) appliqués. Aux faibles niveaux de contrainte, correspondant à un taux de cisaillement faible, les déformations permanentes augmentent au début du chargement puis se stabilisent à une valeur d'équilibre. Par contre, lorsque le niveau de contrainte devient très élevé, ces déformations s'accumulent et entraînent la rupture éventuelle de l'échantillon. Le niveau de contrainte est ainsi l'un des facteurs les plus importants affectant le développement des déformations permanentes dans les matériaux granulaires, d'où la nécessité de maintenir ce niveau de contrainte à une valeur limite pour limiter les dégradations par ornièrage. Les deux GNT testées dans cette étude offrent des valeurs de déformation permanente inférieures à 2 % avec une meilleure résistance à l'ornièrage pour le basalte de Diack que pour le quartzite de Bakel.

Références

- [1] - G. GIDEL, P. HORNYCH, J. J. CHAUVIN, D. BREYSSE et A. DENIS, "Nouvelle approche pour l'étude des déformations permanentes des graves non traitées à l'appareil triaxial à chargements répétés", *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, N°233, juil.-août (2001) 5 - 21
- [2] - T. HABIBALLAH, "Modélisation des déformations permanentes des graves non traitées. Application au calcul de l'orniérage des chaussées souples", Thèse de doctorat Génie civil, Université de Limoge, Limoge, (2005) 177 p.
- [3] - M. BA, J. M. TINJUM and M. FALL, "Prediction of permanent deformation model parameters of unbound base course aggregates under repeated loading", *Road Materials and Pavement Design*, DOI: 10.1080/14680629.2015.1063534, (2015)
- [4] - M. BA, K. NOKKAEW, M. FALL and J. M. TINJUM, "Effect of Matric Suction on Resilient Modulus of Compacted Aggregate Base Courses", *Geotech Geol Eng*, DOI 10.1007/s10706-013-9674-y, (2013)
- [5] - LCPC et SETRA, "Conception et dimensionnement des structures de chaussées : guide technique", Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, (1994)
- [6] - M. BA, "Comportement mécanique sous sollicitations cycliques de granulats quartzitiques de Bakel - Comparaison avec des matériaux de référence du Sénégal et d'Amérique (USA)", Thèse de doctorat Géotechnique routière, Université Cheikh Anta Diop, Dakar, (2012)
- [7] - S. F. SAID, H. HAKIM, E. OSCARSSON and M. HJORT, "Prediction of flow rutting in asphalt concrete layers", *International Journal of Pavement Engineering*, 12 (6) (2011) 519 - 532, DOI: 10.1080/10298436.2011.559549
- [8] - S. ERLINGSSON and M. S. RAHMAN, "Evaluation of Permanent Deformation Characteristics of Unbound Granular Materials by Means of Multistage Repeated-Load Triaxial Tests", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Transportation Research Board of the National Academies*, Washington, D.C., N° 2369 (2013) 11 - 19, DOI: 10.3141/2369-02
- [9] - M. S. RAHMAN and S. ERLINGSSON, "Predicting Permanent Deformation Behaviour of Unbound Granular Materials", *International Journal of Pavement Engineering*, DOI: 10.1080/10298436.2014.943209, (2014)
- [10] - M. S. RAHMAN and S. ERLINGSSON, "Characterizing the Impact of Moisture on the Permanent Deformation Behaviour of Unbound Granular Materials", *Compendium of Papers of the 94th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington DC, (2015)
- [11] - NCHRP, "Laboratory determination of Resilient Modulus for flexible pavement design", National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) Project 1-28A. Transportation Research Board of National Academies, (2004)
- [12] - A. CALVAR, J. P. BILODEAU et G. DORE, "Détermination de la résistance à la déformation permanente des matériaux granulaires de fondation de chaussées", Ministère des Transports du Québec, Rapport GCT-2013-01, (2014)
- [13] - F. LEKARP and A. DAWSON, "Modelling permanent deformation behaviour of unbound granular materials", *Construction and Building Materials*, Vol. 12, N°1 (1998) 9 - 18
- [14] - S. WERKMEISTER, A. R. DAWSON and F. WELLNER, "Permanent Deformation Behavior of Granular Materials and the Shakedown Concept", In *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1757, TRB, National Research Council, Washington, D.C., (2001) 75 - 81
- [15] - M. BA, "Correlation Between Resilient Modulus and Permanent Deformation During a Large Scale Model Experiment of Unbound Base Course", H. Tran-Nguyen et al. (eds.), *Proceedings of the 4th Congrès International de Géotechnique - Ouvrages - Structures, Lecture Notes in Civil Engineering 8*, DOI 10.1007/978-981-10-6713-6_37 (2018)

- [16] - R. D. BARKSDALE, "Laboratory evaluation of rutting in base course materials", In Proceedings of the third International Conference on Structural Design of Asphalt Pavement, London, (1972) 161 - 174
- [17] - G. T. H. SWEERE, "Unbound granular basis for roads", PhD thesis, University of Delft, Delft, Netherlands, (1990)
- [18] - J. L. PAUTE, P. JOUVE et E. RAGNEAU, "Modèle de calcul pour le dimensionnement des chaussées souples", *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, N°156 (juil.-août 1988) 21 - 36
- [19] - F. LEKARP, "Permanent deformation behaviour of unbound granular materials", Licentiate thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, (1997)
- [20] - P. HORNYCH, J. F. CORTE et J. L. PAUTE, "Étude des déformations permanentes sous chargements répétés de trois graves non traitées", *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, N°184 (mars- avril 1993) 77 - 84
- [21] - P. HORNYCH, A. KAZAI et A. QUIBEL, "Modelling a full scale experiment of two flexible pavement structures", *Unbound Aggregates in Road Construction*, Rotterdam, (2000) 359 - 367
- [22] - K. H. TSENG and R. L. LYTTON, "Prediction of Permanent Deformation in Flexible Pavement Materials", *American Society for Testing and Materials*, STP 1016, (1989) 154 - 172