
Etude du comportement des matériaux fins de plateforme ferroviaire

B. K. Yoka¹, P. Breul², M. Morvan²

¹ Institut Pascal, Polytech Clermont-Ferrand, Université Clermont Auvergne, 24 avenue des Landais, BP 206, 63174 AUBIERE Cedex France, mail : Bilal.YOKA_KHAIL@etu.uca.fr

² Institut Pascal, Polytech Clermont-Ferrand, Université Clermont Auvergne, 24 avenue des Landais, BP 206, 63174 AUBIERE Cedex France.

RÉSUMÉ. La ligne de chemin de fer qui traverse le Gabon du Nord-Ouest vers le Sud-Est, constitue le moyen de transport stratégique vis-à-vis du développement économique du pays. Or, une partie de l'infrastructure ferroviaire est construite sur des sols fins à priori inaptes à recevoir une plateforme ferroviaire. Sur cette partie de la ligne, sont répertoriés des problèmes d'instabilité récurrents et dont l'ampleur devient encore plus importante avec l'augmentation de la charge à l'essieu des wagons des trains minéraliers à plus de 25 tonnes. Selon [LI 95], les mécanismes de défaillances survenant sur les plateformes ferroviaires en matériau fins argileux sont dus à la combinaison de trois facteurs : la nature argileuse du sol de plateforme, la présence d'eau et l'effet du chargement cyclique des essieux des différents véhicules ferroviaires. Dans cet article, nous nous intéressons à l'étude du comportement des sols argileux des plateformes ferroviaires dans le contexte d'augmentation de la charge à l'essieu, en prenant en compte la variation de leur état hydrique.

ABSTRACT. The railway line which crosses Gabon from North-West to South-East, constitutes the strategic means of transport contributing to the economic development of the country. However, part of the railway infrastructure is built on fine-grained soils that are not likely to receive a railway subgrade. On this part of the line, recurring problems of instability are listed, the magnitude of which becomes even greater with the increase of the axle load of the wagons of ore trains to more than 25 tons. According to [LI 95], the failure mechanisms occurring on railway subgrades with clay material are due to the combination of three factors: the clay type of the subgrade soil, the presence of water and the effect of the cyclic loading. In this paper, we are interested in studying the behavior of clay subgrades soils in the context of increasing the axle load, taking into account the variation their moisture condition.

MOTS-CLÉS : plateforme argileuse, état hydrique, chargement cyclique, déformations.

KEY WORDS : clay subgrade, moisture condition, cyclic loading, deformations.

1. Introduction

Dans le contexte de développement actuel du Gabon, la voie ferrée est de plus en plus sollicitée pour le transport des biens et des personnes. Pour cela, elle doit supporter les différentes charges ferroviaires notamment celle des trains de fret et des trains minéraliers qui tendent à augmenter.

La voie ferrée classique comprend plusieurs composants dont les rails, les traverses, le système d'attaches, les couches d'assise et la plateforme [USM 15]. Selon [LI 95], le sol de plateforme est souvent constitué de sols fins de faible résistance et de faible perméabilité. Son comportement dépend de plusieurs facteurs, notamment de la nature du sol, de son état hydrique et du niveau de chargement. Dans le cas des plateformes en matériaux fins argileux, la présence d'eau réduit de façon significative sa résistance de telle sorte de faciliter le développement des défaillances de la plateforme, même à des niveaux de chargements répétés peu importants. Les mécanismes de défaillances tels que la rupture progressive par cisaillement, la déformation plastique excessive (ou « ballast pocket ») et l'attrition par le ballast sont caractéristiques des plateformes ferroviaires en matériaux fins argileux pour lesquels la condition de non drainage est souvent évidente en saisons humides, en raison de leur faible perméabilité. Avec le chargement répété, les différents mécanismes sont caractérisés par une augmentation de la pression de l'eau contenue dans le sol de plateforme et un développement des déformations permanentes. La rupture se produisant à des niveaux de déformations plastiques importantes [BUR 06].

Dans le cas de la ligne de chemin de fer gabonais, la plateforme est constituée de sols argileux généralement exposé à l'eau en saison des pluies. Cette constitution est à l'origine d'un certain nombre de problèmes

d'instabilité récurrents localisés sur le premier tronçon de la ligne. Sur ce tronçon sont généralement répertoriés les problèmes de poches de ballast, les phénomènes d'attrition (avec et sans pompage de boue), les problèmes de tassements de consolidation, les problèmes de poinçonnement et d'affaissement de la plateforme. A l'heure actuelle, la plupart des études préalables sur la réponse des sols fins sous sollicitations cycliques se limitent aux cas des sols saturés de classe A1 ou A2 (au sens de la classification GTR). Peu d'entre elles abordent l'aspect non saturé des sols et le comportement des sols de types A3 ou A4. Ainsi, pour mieux comprendre le comportement du sol de la plateforme de la ligne de chemin de fer gabonais en particulier, et celle des sols fins sous sollicitation cyclique en général, nous prendrons en compte la variation de l'état hydrique.

Dans cet article, nous ferons dans un premier temps, une brève présentation du comportement mécanique des sols fins sous sollicitation cyclique puis dans un second temps, nous présenterons notre démarche expérimentale pour l'étude de ces sols dans le contexte d'exploitation ferroviaire.

2. Etat de l'art

Le comportement mécanique des sols fins sous sollicitation cyclique a déjà fait l'objet de plusieurs études depuis le début des années 1960 [LEA 13]. Ces études ont montré qu'en fonction de l'amplitude du chargement cyclique, le sol peut se rompre ou rester dans un certain état d'équilibre [AND 80], [ANS 89] et [SAN 68]. Cela met ainsi en évidence l'existence d'un niveau critique de contrainte cyclique qui fixe la limite entre le domaine d'état d'équilibre et le domaine où la rupture peut se produire. La définition du niveau critique de contrainte cyclique a été donnée pour la première fois par Larew et Leonards en 1962. Mais à l'heure actuelle, avec l'évolution en matière d'étude des sols non saturés, la nécessité de prendre en compte l'effet de la succion dans la réponse de ces sols sous sollicitation cyclique devient un enjeu majeur quand la plupart des premières études à ce sujet se limitent à l'étude de l'effet de la nature du sol ou de l'histoire des contraintes. Plusieurs études ont mis en évidence l'influence de la succion sur les caractéristiques mécaniques du sol non saturé. Des auteurs comme [MAA 04] et [FRED 12] ont montré qu'avec l'augmentation de la succion, le sol non saturé présente une meilleure résistance au cisaillement. D'autres études, comme celle de [VAN 13] et [YAN 05] ont montré également que l'augmentation de la succion a pour effet d'augmenter la rigidité du sol et donc le module réversible et la capacité portante.

C'est seulement depuis quelques décennies que l'étude du comportement des sols non saturés suscite un intérêt particulier pour les chercheurs, en raison notamment des nombreux problèmes d'ingénieries rencontrés sur différents ouvrages en génie civil (barrages en terre, talus, plateforme routière et ferroviaires, fondations des bâtiments, etc) [FRE 12]. Cela du fait que les théories de la mécanique des sols classiques, basées sur le postulat de Terzaghi, en 1936, trouve ses limites lorsque le sol devient non saturé. Le postulat de Terzaghi est encore aujourd'hui utilisé pour modéliser le comportement mécanique des sols saturés ou secs, lorsque les pores sont remplis d'une seule phase (eau ou air) [GEI 99]. Terzaghi propose alors de distinguer le tenseur de contrainte effective, qui décrit le comportement du squelette solide du sol, par rapport à celui de l'eau. Or à l'état naturel, les sols se trouvent à des degrés de saturations variables. Quand le sol est non saturé, la succion, différence entre les pressions d'eau et d'air, devient un paramètre supplémentaire qui gouverne le comportement mécanique du sol. Elle résulte de l'interaction entre les phases liquide et gazeuses, quand celles-ci sont en équilibre dans les pores du sol. C'est autour des années 1960 que le concept de la contrainte effective de Terzaghi a été élargi au cas des sols non saturés, intégrant ainsi la succion comme nouveau paramètre [FLE 08]. Le cas des sols saturés peut alors être considéré comme un cas particulier de la mécanique des sols [MAA 04]. L'expression de la contrainte effective la plus célèbre qui a été reprise pour la modélisation du comportement des sols non saturés est celle proposée par Bishop en 1959 [FRE 12] [FLE 08].

3. Dispositif expérimentale et conditions d'essai

Pour étudier le comportement mécanique des sols fins sous sollicitation cyclique, nous avons choisi d'effectuer des essais triaxiaux à l'aide de l'appareil triaxial de Bishop et Wesley (1975) modifié. Les essais seront menés sur des éprouvettes de sol provenant de la plateforme ferroviaire de la ligne du chemin de fer gabonais. Les différentes éprouvettes seront compacté à la densité sèche in-situ puis initialement placées à différents degrés de saturation ; donc à différents niveaux de succion initiales. Nous les soumettrons ensuite à une procédure de chargement par palier sous différents niveaux de contraintes cycliques. Cette procédure permettra de prendre en compte la variation du degré de saturation à l'état in-situ et l'influence de l'augmentation de la charge à l'essieu. Le sol de plateforme étant souvent exposé à l'eau du fait du mauvais drainage et en raison de sa nature argileuse (faible perméabilité), l'eau y est drainée sur le long terme. C'est pourquoi, nous choisissons de mener ces essais en condition de non drainage. Avec le chargement cyclique, l'accumulation de la pression d'eau

excessive engendre une réduction de la contrainte effective ce qui se traduit par la baisse de la résistance du sol ; et donc l'augmentation des déformations [BUT 03], [LI 96]. Si les charges cycliques sont trop importantes, la rupture peut se produire [LOH 11] [BUR 06]. Les essais de compression cyclique, en condition de non drainage, nous permettront d'analyser d'une part l'effet du chargement sur la pression d'eau et sur le développement des déformations et d'autre part de déterminer les lignes d'état critique et les lignes d'état d'équilibre pour les différents teneurs en eau initiale.

Les échantillons seront soumis à une procédure de chargement par palier sous différents niveaux de contraintes cycliques. Nous leur appliquerons un déviateur cyclique suivant un signal de type sinusoïdal. La fréquence de charge des essieux des wagons des trains minéraliers circulant à 60 km/h est de 9 Hz. Cette valeur correspond également à la fréquence de charge des essieux des véhicules des trains de fret circulant à une vitesse comprise entre 60 km/h et 70 km/h [COS 17]. Du fait de la limitation de l'appareil triaxial utilisé, les échantillons seront sollicités avec une fréquence de charge d'un cycle par minute (environ 0,02 Hz). En condition de non drainage, la fréquence de charge influence la vitesse d'accumulation de la pression d'eau. Sous une basse fréquence de charge, la pression d'eau a plus de temps de s'accumuler entre chaque cycle d'application du déviateur, ce qui engendre des déformations plus importantes dans les premiers cycles de chargement [BUT 03] [LOH 11]. Toutefois, la fréquence de charge n'a pas d'effet sur le niveau d'état d'équilibre du sol en compression non drainée [LOH 11].

Préalablement aux essais cycliques, nous effectuerons des essais triaxiaux monotones, à déformations contrôlées. Le but des essais triaxiaux monotones étant de déterminer les paramètres de rupture de Mohr-Coulomb M et S tels que $q_{\max} = M \cdot p_{\max} + S$ [TRI 11]. Nous déterminerons également les courbes de rétention d'eau des sols étudiés.

4. Résultats

A l'heure actuelle, les premiers essais que nous avons effectué sont les essais de détermination des courbes de rétention d'eau. Ces essais ont été effectués sur les échantillons de sol prélevés sur deux sites de la voie ferrée, les zones 7 (PK59+673) et 11 (PK61+400), et menés suivant la méthode ASTM D5298 qui décrit la procédure de mesure de la succion du sol par la méthode du papier filtre.

Nous présentons ici les résultats de la première partie des essais. Nous avons compressé statiquement cinq éprouvettes de sol à la densité correspondant à 95% de l'OPM et à cinq teneur en eau initiale correspondant aux degrés de saturation de 100%, 95%, 90%, 85% et 75%. Les caractéristiques des échantillons de sol prélevés sur les deux zones d'étude sont données dans le tableau suivant :

	γ_s (g.cm ⁻³)	$w_{\text{naturelle}}$ (%)	VBS	W_L (%)	IP (%)	<2mm (%)	<0,080mm (%)	w_{OPM} (%)	γ_{dOPM} (g.cm ⁻³)	$\text{CBR}_{\text{immersion}}$
Zone 7	2,67	40	7,4	71	34	89,6	86,6	18,9	1,648	3,7
Zone 11	2,72	35,4	7	76	48	79,7	75,6	15,5	1,84	2,25

Tableau 1. Caractéristiques des sols étudiés

Les résultats obtenus sont présentés dans la figure 1.

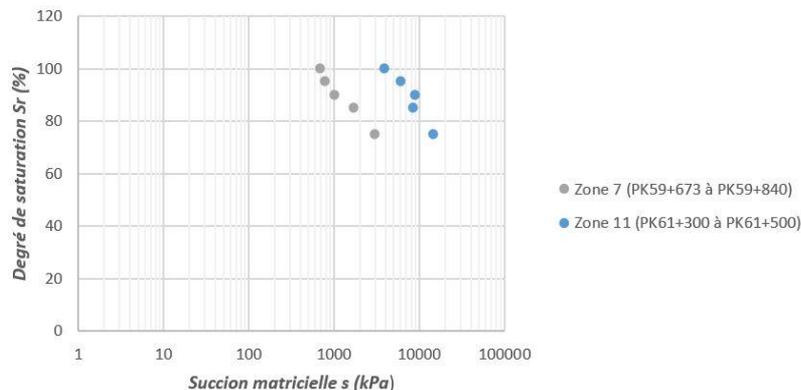


Figure 1. Courbe de rétention d'eau des échantillons prélevés sur les deux zones d'études

D'après les résultats de cette première partie d'essais, on remarque que la succion d'entrée d'air pour les deux sites est comprise entre 700 et 4000 kPa. Ces résultats sont en concordance avec l'estimation de [ZER 91] dans le cas des argiles ($s_e \approx 1000 - 4500$ kPa).

5. Conclusion

Avec la variation du degré de saturation à l'état in-situ, il est important de prendre en compte l'influence de ce paramètre sur la réponse du sol fin de plateforme ferroviaire sous sollicitation cyclique. Les travaux que nous effectuons doivent nous permettre non seulement de comprendre l'influence de l'augmentation du niveau de chargement cyclique sur la pression d'eau et les déformations des sols étudiés mais aussi de parvenir à estimer ces niveaux de déformations et de définir des niveaux d'états critiques fonctions du degré de saturation, pour évaluer le risque de rupture du sol.

6. Bibliographie

[AND 80] ANDERSEN K.H., POOL J.H., BROWN S.F. AND ROSENBRAND W.F., « Cyclic and static laboratory tests on drammen clay », *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, 106(GT5):499{529, 1980.

[ANS 89] ANSAL, A.M. AND ERKEN, A. « Undrained behavior of clay under cyclic shear stresses », *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 115(7):968{983, 1989.

[BUR 06] BURROW M. P. N. ET AL., « A comparison of railway track foundation design methods », *Proc. IMechE*, Vol.221, Part F :J. Rail and Rapid Transit, 2006.

[BUT 03] BUTALIA T. S. ET AL., « Effect of Moisture Content and Pore Water Pressure Buildup on resilient Modulus of Cohesive Soils in Ohio », *Resilient Modulus testing for Pavement Components*, ASTM STP 1437, G. N. Durham, W. A. Mart, and W. L. De Groff, Eds., ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003.

[COS 17] COSTA R. ET AL., « Large-scale Triaxial Apparatus For railroad Ballast Material », *Proceedings Symposium International GEORAIL 2017 International symposium*, 2017.

[FLE 08] FLEUREAU J-M., COUSSY O., *Mécanique des sols non saturés*, Paris, Editions Lavoisier, 2002.

[FRE 12] FREDLUND D. G., RAHARDJO H. AND FREDLUND M. D., *Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice*, USA, Copyright by John Wiley & Sons, Inc, 2012.

[GEI 99] GEISER F., Comportement Mécanique d'un limon non saturé Etude Expérimentale et Modélisation Constitutive, Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Belgique, 1995.

[LEA 13] LEAL A. N. AND KALIAKIN V. N., Behavior of Cohesive Soils Subjected to Cyclic Loading : An Extensive review of Pertinent Literature, Research Report, Newark, Delaware, U.S.A., septembre 2013.

[LI 95] D. LI ET E. T. SELIG, « Evaluation of Railway Subgrade Problems », *Transportation Research Record 1489*, 1995.

[LOH 11] LOH B. H., Behavior of Railway Track Subgrade under Cyclic loading, Thesis, Curtin University, November 2011.

[MAA 04] MAAITAH O. M. AND MAHADIN S. A., « Variation on shear strength of Unsaturated Subgrade Causes Road cracks », *Journal of Applied Sciences* 4(3):335-339, 2004.

[SAN 68] SANGREY D. A., The behaviour of soils subjected to repeated loading, PhD thesis, Cornell University, 1968.

[TRI 11] TRINH V., Comportement hydromécanique des matériaux constitutifs des plateformes ferroviaires anciennes, Thèse de Doctorat, Université Paris-Est, France, 2011.

[USM 15] USMAN K. ET AL., « Railway track subgrade failure mechanisms using a fault chart approach », *The 5th International Conference of Euro Asia Civil Engineering Forum (EACEF-5)*, *Procedia Engineering* 125 (2015) 547-555.

[VAN 13] VANAPALLI S. K. AND HAN Z., « Prediction of the Resilient Modulus of Unsaturated Fine-Grained Soils », *Proc. Of Int. Conf. On Advances in Engineering, AETACE*, 2013.

[YAN 05] YANG S-R. ET AL., « Variation of Resilient Modulus with Soil Suction for Compacted Subgrade Soils », *Transportation Research Record : journal of the Transportation Research Board, No. 1913, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D. C., 2005, pp. 99-106.*

[ZER 91] ZERHOUNI M. I., Rôle de la pression interstitielle négative dans le comportement des sols—Application au calcul des routes, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 1991.