

Comportement irréversible des matériaux granulaires des plateformes ferroviaires soumises aux charges uniformes et répétées

K.Karraz, J. Canou & J-C. Dupla
UR Navier-CERMES Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France
G. Bonnet
Laboratoire MSME – Université Paris-Est, Marne la vallée, France



ABSTRACT

Due to repeated passage of trains at high speeds, differential settlements are observed in the longitudinal direction of the railway track. In particular, the settlement of infrastructures incurs track maintenance costs. This settlement of infrastructure is besides closely linked to the constitutive materials stressed by the cyclic loading.

The present work aims to study the irreversible behavior of the ballast materials under cyclic stresses at large number of cycles, in particular, the goal of characterising a settlement law under cyclic stresses by integrating the applied stresses, the variation with the number of cycles.

RÉSUMÉ

A cause du passage répété de trains à grandes vitesses, des tassements verticaux différentiels sont observés tout au long de la voie ferrée. En particulier, le tassement des infrastructures conditionne le coût de maintenance des voies. Ce tassement d'infrastructure est par ailleurs étroitement lié aux propriétés des matériaux constitutifs sollicités par le chargement cyclique.

Le présent travail a justement pour but d'étudier le comportement irréversible des matériaux de ballast sous sollicitations cycliques à grand nombre de cycles, en particulier dans le but de caractériser une loi de tassement sous sollicitation cyclique intégrant les contraintes appliquées, la variation avec le nombre de cycles.

1 PROCEDURES EXPERIMENTALES

1.1 Dispositif d'Essais

L'expérimentation utilisant un appareil triaxial Φ 300 mm (300mm de diamètre et 600 mm de hauteur) a été effectuée sur un matériau dénommé « micro-ballast ».

1.2 Présentation de l'Appareil Triaxial

La cellule triaxiale (fig. 1) permet de solliciter des éprouvettes de grandes dimensions (300 mm de diamètre et 600 mm de hauteur). La base de la cellule est équipée d'un piston, mobile verticalement, qui peut, si nécessaire, permettre d'améliorer le positionnement vertical de l'éprouvette. Les éprouvettes sont soumises à un état de contrainte initial donné (isotrope ou anisotrope), puis soumises à une sollicitation de cisaillement grâce au servovérin (aux capacités 500 kN) qui joue le rôle du piston de la cellule.

L'effort axial est mesuré à l'aide d'un capteur de force qui est placé sous l'embase inférieure pour s'affranchir des effets des frottements parasites entre le piston du servovérin et le couvercle. Et pour évaluer la déformation axiale de l'échantillon, on mesure de déplacement du piston dès que celui-ci est en contact avec l'éprouvette.

La cellule est dimensionnée pour une pression de confinement maximale de 2MPa. Le servovérin, piloté grâce à un système d'asservissement digital MTS-HextestTeststar, permet d'appliquer des sollicitations monotones ou cycliques, asservies en force ou en déplacement.

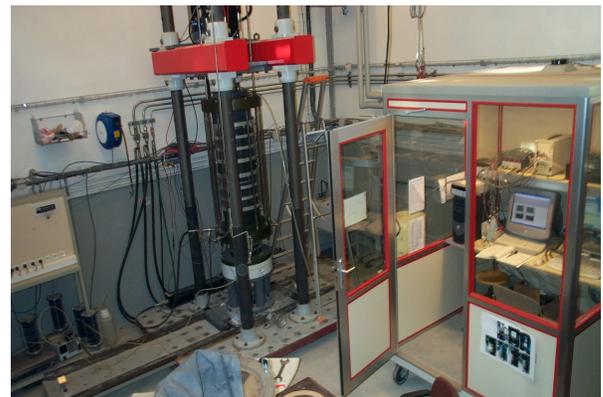


Figure 1. La cellule triaxiale [Φ 300] mm du CERMES.

Dans la gamme cyclique, le système est conçu pour réaliser des essais du type fatigue, comportant un grand

nombre de cycles (jusqu'à plusieurs millions) à des fréquences pouvant aller jusqu'à quelques dizaines de Hertz, fonction de l'amplitude en déplacement de la sollicitation. Lors des essais, on réalise des mesures de pression (pression de confinement, pression interstitielle éventuelle dans le cas saturé), des mesures d'effort, des mesures de variation de volume des éprouvettes (cas saturé) et des mesures de déplacement nécessaires au calcul des déformations de l'éprouvette (mesures globales et mesures locales, nécessaires pour une évaluation précise des déformations dans la gamme des petites déformations).

L'acquisition et le traitement des données sont réalisés sur un ordinateur, via une carte d'acquisition rapide adaptée aux sollicitations dynamiques.

1.3 Matériau Testé

Le matériau testé est le micro-ballast, un modèle réduit à l'échelle 1/3 du ballast réel. Les grains présentent une angularité et une rugosité marquées. La courbe granulométrique de ce matériau est présentée sur la figure 2.

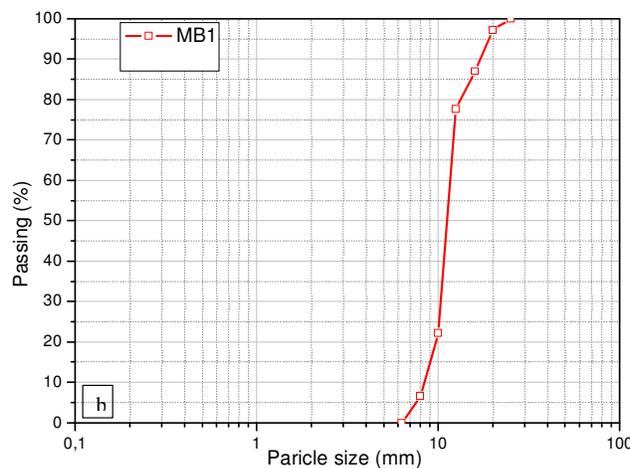


Figure 2 : courbe granulométrique de micro-ballast

Dont la granulométrie du micro-ballast est similaire à celle d'un ballast réel, mais de classe 6/24mm au lieu de 18/72 mm

2 COMPORTEMENT SOUS CISAILLEMENT MONOTONE

2.1 Résultats Expérimentaux

On présente dans cette partie les résultats des essais réalisés en compression monotone en vue d'obtenir des paramètres de sol utilisables dans les modèles de comportement, en particulier des paramètres caractérisant le comportement dans les petites déformations (paramètres « élastiques), des paramètres

caractérisant les irréversibilités et l'écroissage et des paramètres de rupture (angle de frottement interne).

2.2 Le programme des essais

Les essais de cisaillement en compression monotone ont été réalisés pour quatre contraintes de consolidation isotrope et un état de densité du matériau retenu pour être représentatif de la masse volumique du matériau mis en place dans le cas réel. Le tableau 1 présente les principales caractéristiques des essais réalisés.

Table 1. Les principales caractéristiques des essais sous cisaillement monotone.

test	Material*	$\rho_{d,i}$ t / m ³	σ_c kPa	\mathcal{E}_a ** %/mn
TM1	MB1	1.733	25	0.20
TM2	MB1	1.726	50	0.20
TM3	MB1	1.733	100	0.20
TM4	MB1	1.,733	200	0.20

*MB1: Micro Ballast (6-24 mm)

** \mathcal{E}_a Taux de cisaillement (%/minute)

1.4 Comportement Globaux Observés

Do La figure 3 (a et b) présente les résultats obtenus pour les quatre état initiaux, en termes des courbes de cisaillement (q, \mathcal{E}_a) et des courbes de déformation volumique ($\mathcal{E}_v, \mathcal{E}_a$). On observe une réponse en déviateur pratiquement proportionnelle à la contrainte de consolidation isotrope appliquée et un matériau d'autant plus contractant que le niveau de consolidation est élevé. Ces résultats sont conformes aux observations généralement faites pour les sols pulvérulents tels que les sables.

1.5 Caractéristiques Elastiques

Une évaluation des modules d'élasticité (modules d'Young) peut être faite en prenant la pente à l'origine des courbes de cisaillement. Cette évaluation permet d'obtenir des modules sécants à 10⁻⁴ qui, même s'ils ne correspondent pas à des modules en très petites déformations, permettent de donner des ordres de grandeur de modules dans cette gamme de déformation. Le coefficient de Poisson peut, lui aussi, être évalué à partir des courbes de déformation volumique, suivant la formule suivante :

$$\nu = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{d\mathcal{E}_v}{d\mathcal{E}_1} \right)$$

La figure 4 présente les résultats correspondants, qui ont aussi été représentés sur la figure 5 en fonction de la contrainte de consolidation appliquée. En ce qui concerne les modules, on peut retenir une loi d'évolution en fonction de la contrainte de consolidation isotrope du type

$$E = E_0 p_c^{0,5}$$

On peut aussi évaluer les modules d'élasticité lors de l'application de cycles de décharge recharge, qui permettent d'obtenir des valeurs plus représentatives d'un comportement réversible. Ces modules ont aussi été représentés sur la figure 4,

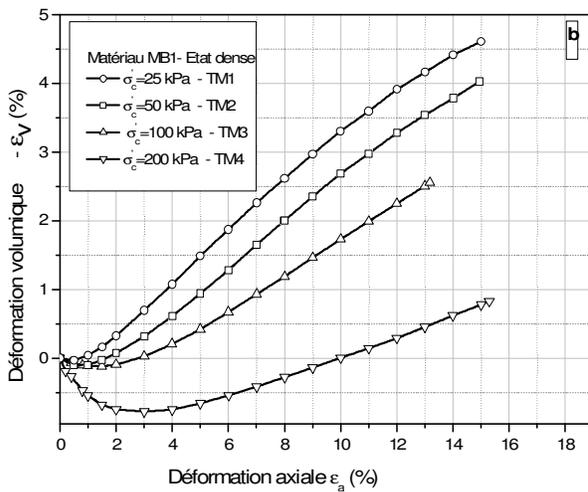
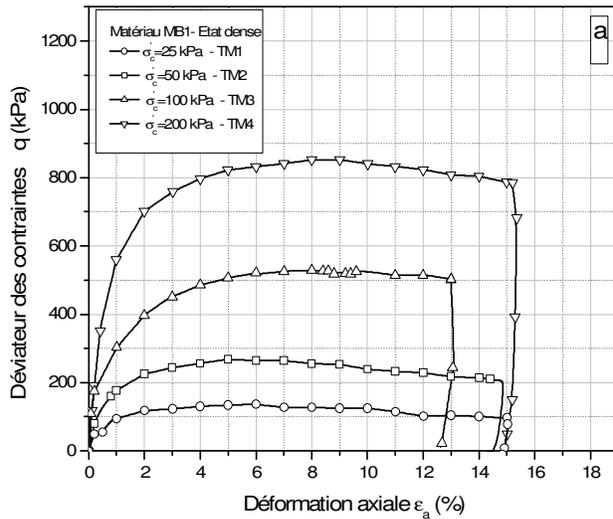


Figure 3: Résultats des essais drainés monotone tri axial

a : courbes de charge (q , ϵ_a)

b : les courbes (ϵ_v , ϵ_a)

1.6 Caractéristique de Rupture

Les caractéristiques de rupture du micro ballast sont recherchées en termes des paramètres du critère de rupture de Mohr-Coulomb, à savoir c' et ϕ' . On a affaire à un matériau pulvérulent pour lequel on peut considérer que la cohésion c' est nul.

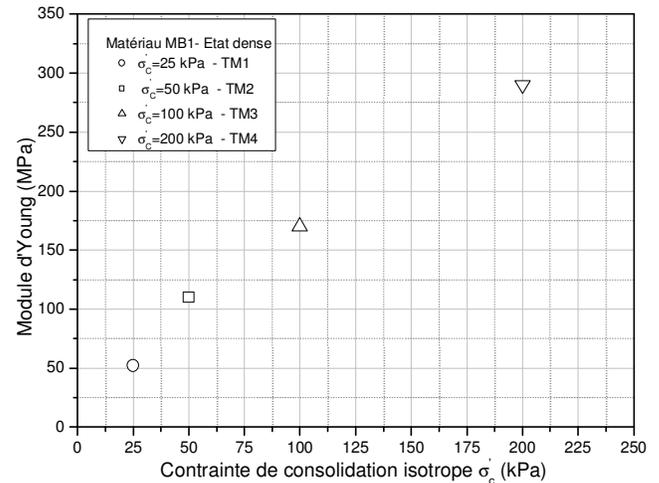


Figure 4: Evaluation du module de Young

3 COMPOURTEMENT SOUS SOLLICITATION CYCLIQUE

3.1 Résultat expérimentaux

On présente dans cette partie les résultats des essais réalisés sous sollicitations cycliques. On s'est, en particulier, intéressé à l'influence de l'état initial des éprouvettes en terme de contrainte de consolidation isotrope (on a gardé le même état de densité), de l'amplitude de la sollicitation cyclique et de la fréquence de chargement sur les comportements observés. On a, en outre, réalisé un essai à grand nombre de cycles (3,5 millions de cycles) pour étudier le comportement dans cette gamme de cycles.

3.2 Programme Des Essais Réalisés

Les caractéristiques des essais réalisés sont données dans le tableau 3.

Table 2. Les principales caractéristiques des essais sous cisaillement cyclique.

test	Material*	TCC**	σ_c (kPa)	F (Hz)
------	-----------	-------	------------------	--------

TC4	MB1	0.40	50	10
TC5	MB1	0.40	50	30-10-1
TC6	MB1	0.40	50	10-5-1
TC7	MB1	0.40	50	1-5-10

*MB1: Micro Ballast (6-24 mm)

**TCC:rate of cyclic shear $TCC = \Delta q_{cyc} / 2\sigma'_c$

L'essai TC4 a permis d'étudier le comportement du ballast sous sollicitation à grande nombre de cycle (3,5 millions de cycles)

Les essais TC5 à TC7 ont permis d'étudier l'influence de la fréquence de sollicitation

3.3 Influence de la Fréquence de Sollicitation

Dans les essais triaxiaux sous sollicitation cyclique, on va étudier l'influence de la fréquence de chargement cyclique sur les comportements observés. D'abord, on a réalisé 3 essais différents avec 3 éprouvettes différentes, à savoir TC5, TC6 et TC7 avec les sollicitations montrées dans les figures 8, 9 et 10 respectivement.

Pour l'essai TC5, on a appliqué un taux de cisaillement cyclique $TCC = \Delta q_{cyc} / 2\sigma'_c = 0.40$ avec la fréquence de chargement = 30Hz pour 60 000 cycles, suivi par une fréquence de chargement = 10Hz pour 20 000 cycles et finalement suivi par une fréquence de chargement = 1Hz pour 2 000 cycles. Pour l'essai TC6, on a appliqué le même taux de cisaillement cyclique $TCC = \Delta q_{cyc} / 2\sigma'_c = 0.40$ avec la fréquence de chargement = 10Hz pour 20 000 cycles, suivi par une fréquence de chargement = 5Hz pour 10 000 cycles et finalement suivi par une fréquence de chargement = 1Hz pour 3 000 cycles. Et pour l'essai TC7, on a appliqué le même taux de cisaillement cyclique $TCC = \Delta q_{cyc} / 2\sigma'_c = 0.40$ avec la fréquence de chargement = 1Hz pour 10 000 cycles, suivi par une fréquence = 5Hz pour 20 000 cycles et finalement suivi par une fréquence de chargement = 10Hz pour 10 000 cycles.

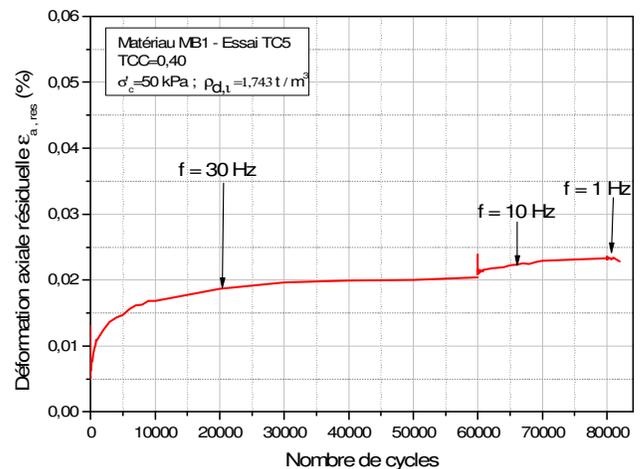


Figure 5: La déformation axiale résiduelle de l'essai TC5

En suite, on a comparé la première séquence de sollicitation pour les 3 éprouvettes différentes, à savoir, 30Hz de TC5, 10Hz de TC6 et 1Hz de TC7, pour établir la figure 6. D'après figure 11, le comportement observé est tel que la déformation axiale résiduelle augmente en augmentant la fréquence de sollicitation.

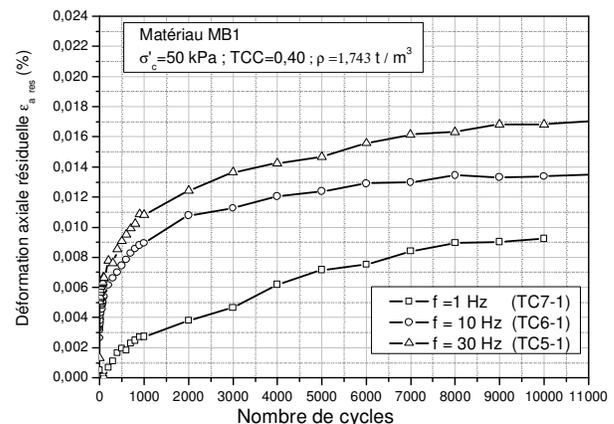


Figure 6 : Première séquence de sollicitation pour trois éprouvettes différentes

Conclusion : Le tassement de l'échantillon ou la déformation axiale résiduelle augmente significativement avec la fréquence d'application pour une première séquence de cycles, puis le tassement par cycle devient progressivement indépendant de la fréquence de chargement, figure 6.

3.4 Le comportement sous sollicitation à grande nombre de cycle :

Dans l'étude de comportement du ballast sous sollicitation cyclique à grande nombre de cycles de chargement on a réalisé l'essai TC4 avec 3.5 millions cycles de chargement, ce qui correspond à l'ordre de grandeur du nombre de cycles appliqués sur une structure réelle.

Pour l'essai TC4 on a appliquée un taux de cisaillement cyclique $TCC = \Delta q_{cyc} / 2 \sigma'_c = 0.40$ avec la fréquence de chargement = 10Hz avec 50 kPa la pression de confinement. On a fabriqué cet essai pour appliquer 3.5 millions cycles de chargement, Figure 7

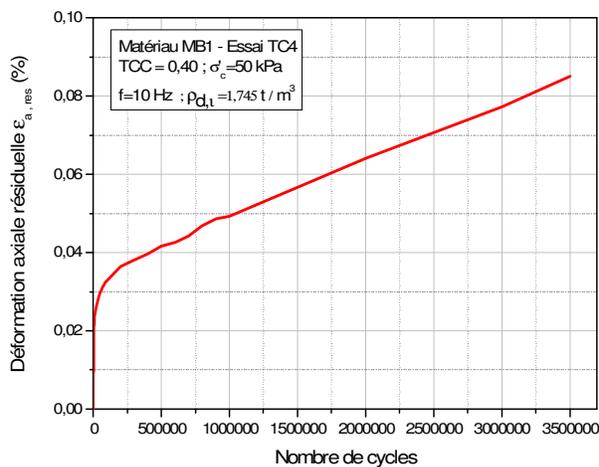


Figure 7. La déformation axiale résiduelle de l'essai TC4S

La déformation axiale résiduelle augmente rapidement au début l'essai, et son augmentation reste significativement avec le nombre des cycles, à l'ordre de $1.4 \times 10^{-8} \% / cycle$, comme il est indiqué dans la figure 7.

4 CONCLUSION

Essais sous un cycle de compression :

Ces essais, ont permis de montrer que les courbes de charge-décharge permettent de caractériser une déformation élastique non-linéaire et une déformation irréversible. Sur ces essais, il a été également réalisé des mesures de variation de volume de l'échantillon, permettant de déterminer en particulier si le comportement est dilatant ou contractant. Les essais poussés jusqu'à rupture ont permis de déterminer les caractéristiques à rupture

et en particulier de mettre en évidence une forte courbure de la courbe intrinsèque sous faible niveau de chargement.

Comme pour les sables, le comportement sous chargement monotone est d'abord contractant, puis dilatant jusqu'à rupture.

Essais sous chargement cyclique :

Les résultats montrent que le tassement par cycle diminue progressivement au cours de l'application du chargement cyclique., comme observé en général sur des matériaux granulaires plus fins(sables)

Le tassement vertical de l'échantillon augmente significativement avec la fréquence d'application pour une première séquence de cycles, puis le tassement par cycle devient progressivement indépendant de la fréquence de chargement.

5. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- Abdelkrim, M. 2004. Analyse par le calcul des structures du comportement cyclique à long terme des infrastructures de transport. PhD thesis, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France
- Benahmad. (2001) Comportement mécanique d'un sable sous cisaillement monotone et cyclique : application au phénomène de liquéfaction et de mobilité cyclique .PhD thesis ,Ecole Nationale des ponts et chaussées,Paris ,France
- Indraratna, B. & Inoscu, D & Christie, H.D. 1998. Shear behavior of railway ballast based on large-scale triaxial tests. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, May 1998.
- Pedro L.S. 2004. Etude du comportement mécanique des sols hétérogènes modèles à son application au cas des sols naturels .PhD thesis, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France
- Karraz, K. and Bonnet, G. Canou, j. Dupla J.C 2007. Mechanical behavior of ballast Comparison between the triaxial experimental results ($\Phi 300$ et $\Phi 100$) , 60th Canadian Geotechnical Conference ,Ottawa CANADA.