

SUIVI DE DÉFORMATIONS DYNAMIQUES DE GÉOGRILLES DANS UNE PLATEFORME FERROVIAIRE

MONITORING OF DYNAMIC STRAINS IN GEOGRIDS EMBEDDED IN A RAILWAY TRACKBED

Olatounde Alexandre YABA^{1,2}, Fabrice EMERIAULT², Oriane JENCK², Jean-François FERELLE¹, Amine DHEMAIED¹

1 SNCF Réseau, DGII – VA – CIR, 6 av. F. Mitterrand, 93574 La Plaine St Denis, France

2 Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, 3SR, 38000 Grenoble, France

RÉSUMÉ – Dans le cadre de la réhabilitation des lignes ferroviaires classiques (vitesse ≤ 220 km/h), SNCF Réseau propose d'intégrer l'utilisation de géogrilles afin d'optimiser et adapter le dimensionnement des structures d'assises à l'évolution du trafic. Ainsi plusieurs expérimentations ont été mises en place pour étudier le comportement de géogrilles sous conditions opérationnelles et quantifier leur apport en termes d'amélioration de portance et de limitation de tassements. Cette communication présente la mise en place et les résultats préliminaires d'une telle expérimentation.

Mots-clés : géogrilles, déformations, instrumentation, sous-couche, trafic ferroviaire.

ABSTRACT – As part of ongoing efforts to renew conventional railway lines (speed ≤ 220 km/h), SNCF Réseau proposes to integrate the use of geogrids to optimize and adapt the design of railway trackbeds to new types of traffic. Thus, several experiments have been set up to study the behaviour of geogrids under operational conditions and to quantify their contribution in terms of improved bearing capacity and limitation of settlements. This paper presents the implementation and preliminary results of such an experiment.

Keywords: geogrids, strains, monitoring, subballast, rail traffic.

1. Introduction

L'augmentation du trafic ferroviaire et des vitesses de circulation imposent de grandes charges cycliques sur les plateformes (couche intermédiaire ou sous-couche et couche de forme). Ce phénomène, qui contribue à l'apparition de défauts de géométrie, est particulièrement présent sur les lignes classiques (vitesse ≤ 220 km/h) du Réseau Ferré National (RFN). Les défauts géométriques engendrés peuvent impacter la sécurité des trains et le confort passager. Ainsi, la SNCF s'est engagée dans d'importants efforts de régénération des lignes classiques. L'utilisation de géosynthétiques, plus particulièrement de géogrilles, permettrait de réaliser ces travaux plus rapidement tout en réduisant les volumes de matériaux nécessaires et en garantissant la durabilité des ouvrages. Les géogrilles présentent des ouvertures de maille de tailles et formes variées. Posées à l'interface de sols granulaires, elles permettraient d'améliorer les propriétés mécaniques de ces sols par verrouillage mécanique des grains dans les mailles (Carroll, 1988).

À l'heure actuelle, les connaissances sur le comportement mécanique des géogrilles et leur apport sous conditions opérationnelles dans le domaine ferroviaire sont limitées, surtout dans le contexte du Réseau Ferré National Français. La majorité des études dans le domaine se focalisent sur l'interaction des géogrilles avec le ballast. Ces études ont montré l'efficacité des géogrilles pour la réduction de l'usure et des tassements du ballast (Horníček et al., 2017 ; Nimbalkar et Indraratna, 2016 ; Lenart et Klompaker, 2014 ; Fernandes et al., 2008 ; Sharpe et al., 2006). Néanmoins, elles ne permettent pas de tirer des conclusions satisfaisantes par rapport à l'amélioration des plateformes. De plus, pour plusieurs raisons, la pose d'une géogrille dans la couche de ballast ou directement en dessous, ne convient pas aux particularités du RFN (techniques de maintenance, trafic, etc.). D'où l'intérêt de mettre en place des expérimentations en conditions opérationnelles, pour quantifier les apports de géogrilles dans les couches sous ballast (sous-couche/couche de forme).

Cette communication présente le renouvellement, l'instrumentation et le suivi préliminaire d'un tronçon qui est équipé pour une mesure dynamique des déformations de deux géogrilles différentes et des contraintes imposées sur la plateforme au-dessus et en-dessous de ces géogrilles.

2. Le site instrumenté

Le site se trouve sur une ligne du réseau TER Bourgogne-Franche-Comté circulée à 120 km/h et recevant un trafic journalier de 3500 à 7000 tonnes équivalentes. Plus précisément, il est composé d'un tronçon qui longe un quai d'une quarantaine de mètres dans une gare de village. Cette gare a été choisie parmi les sites potentiels parce que, sur les quinze à vingt trains qui y circulent, un seul s'arrête par jour. Ainsi le site fournit un bon échantillon de trains pour les mesures dynamiques, tout en bénéficiant d'un accès facile et d'une alimentation stable en électricité.

Le site a été instrumenté dans le cadre de travaux de modernisation qui ont eu lieu sur la ligne au premier semestre 2020. Les études d'avant-projet ont mis en évidence, sur plusieurs tronçons, la présence de problèmes de drainage et d'une structure de faible portance sous ballast. Cette situation favorisait la remontée de fines par pompage hydraulique sous les sollicitations du trafic. Ainsi le renouvellement des composants de la voie (ballast et traverses), sans renouvellement de la plateforme (la couche intermédiaire, dans ce cas) aurait pu dégrader la situation. Il a donc été proposé de purger jusqu'à 35 cm sous le fond de dégarnissage du ballast et de poser un géotextile de séparation/filtration, une géo grille et 35 cm de sous-couche en Graves Non-Traitées GNT (granulométrie de 0 à 31,5 mm). Ainsi une excellente occasion s'est présentée pour instrumenter un des tronçons concernés afin d'étudier son comportement sous conditions opérationnelles.

Le tronçon a été scindé en trois zones (Figure 1). Deux zones ont été équipées avec des géo grilles (GGR1 et GGR2) et une zone a été laissée sans géo grille, pour servir de référence. Au total, il y a huit sections instrumentées, trois pour chacune des géo grilles (S1, S2 et S3) et deux pour la zone de référence (REF_2 et REF_2).

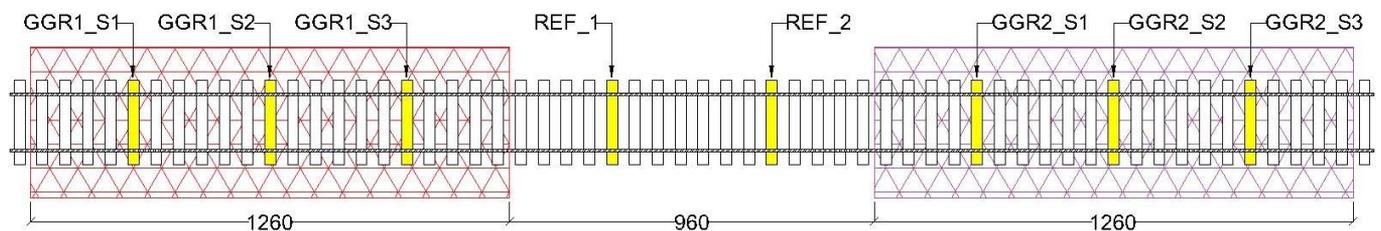


Figure 1. Configuration du site (valeurs en cm, 60cm entre axes de traverses)

Les deux géo grilles sont constituées de polypropylène étiré à maille triangulaire ayant une hauteur hexagonale de 80 mm (Figure 2), et 100 % d'efficacité de nœud (cf. European Organisation for Technical Approvals, 2017). Les seules caractéristiques qui différencient les deux géo grilles sont les rigidités radiales sécantes à 0,5 % et 2 % d'élongation. Elles sont de 480 kN/m et 360 kN/m respectivement pour la GGR1 et de 360 kN/m et 250 kN/m respectivement pour la GGR2 (avec un protocole expérimental quasi-statique). Ces deux géo grilles ont été sélectionnées afin d'étudier l'influence de la raideur sur les performances dans une plateforme donnée. Notons qu'un géotextile de séparation/filtration a été posé en fond de fouille sur tout le tronçon, la zone de référence y compris.

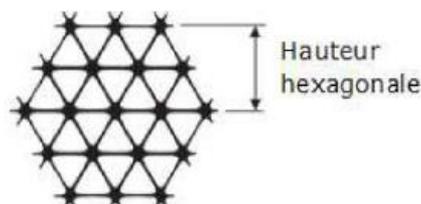


Figure 2. Géogrille à maille triangulaire

Le sol-support (sol naturel) est constitué de matériau sablo-limoneux avec des poches de gravier alluvionnaire roulé. Des essais de portance ont été réalisés sur le fond de purge à l'aide d'une plaque dynamique légère (minidynTM). Ils ont confirmé que le sol-support est de faible portance. La minidynTM a une plaque de diamètre 30 cm, transmet 98,1 J au sol à chaque coup et est capable de mesurer des modules de 10 à 80 MPa (Rincent ND Technologies, 2017). Sur les 60 essais réalisés à la réception du fond de fouille, 45 ont mesuré une portance (Module E_{v2}) inférieure à 30 MPa, ce qui signifie que l'arase terrassement est classifiée « impropre en l'état à supporter toute structure de voie » selon le référentiel

SNCF. La Figure 3 présente toutes les valeurs mesurées. On constate qu'il y a plusieurs valeurs anormalement élevées (> 30 MPa), surtout sur la partie gauche du tronçon ; elles résultent de la présence de poches de gravier. En excluant ces valeurs, on obtient une portance moyenne de 23,92 MPa avec un écart type de 4,75 MPa.

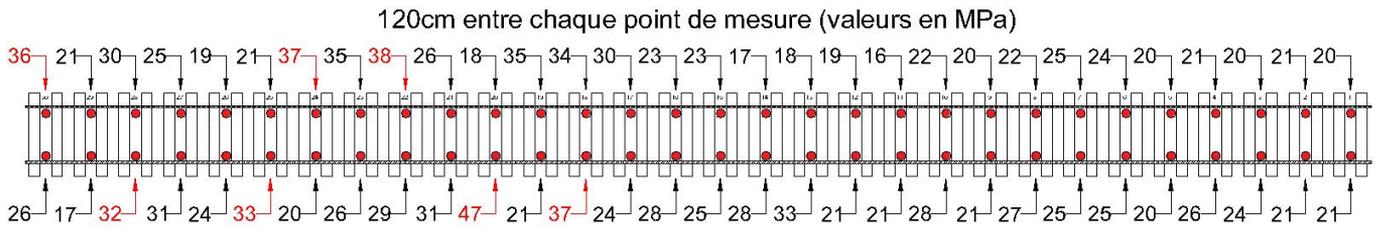


Figure 3. Portance du site (60cm entre axes de traverses)

Chaque géogrille a été instrumentée avec neuf jauges de déformation, collées sur des brins transversaux tel qu'illustré sur la Figure 4. À chaque section, les jauges ont été positionnées : a) dans l'axe de la voie, à 762 mm de chaque rail (GGRx_Sx_1) ; b) dans un axe intermédiaire, à 187 mm du rail extérieur (GGRx_Sx_2) ; c) sous le rail extérieur (GGRx_Sx_3). L'axe intermédiaire représente la position où l'on peut attendre une contrainte médiane entre celle appliquée sous le rail et celle appliquée dans l'axe de la voie, au passage d'un train. Les rectangles sur la figure représentent les traverses.

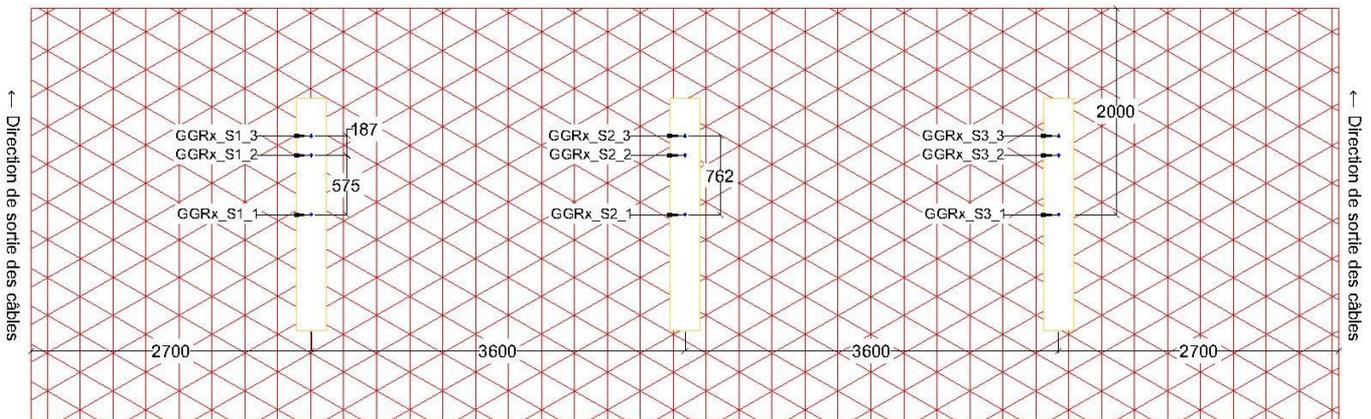


Figure 4. Schéma de collage des jauges de déformation (valeurs en mm)

Les retours d'expérience d'un site précédent ont révélé que les variations de température sont à l'origine d'une grande partie des déformations irréversibles de ce type de géogrille. Des sondes de température de type PT100 ont donc été placées entre le géotextile et la géogrille, à chaque section de mesure, pour permettre la compensation des écarts de mesure dus aux variations de température.

Des cellules de pression totale ont été enterrées à 100 mm en-dessous et/ou à 200 mm au-dessus de la géogrille, en fonction de la section de mesure. En effet les cellules de pression totale sont : a) absentes aux sections GGR1_S1 et GGR2_S3 ; b) présentes uniquement sous la géogrille aux sections GGR1_S3 et GGR2_S1 ; c) et présentes aux deux positions aux quatre autres sections. Ainsi nous avons les coupes illustrées sur la Figure 5.

Tous les capteurs ont été branchés sur une centrale d'acquisition CRONOSflex (imc Test & Measurement GmbH) équipée d'un système de télétransmission pour permettre un suivi à distance. La centrale fait un échantillonnage à 2000 Hz en continu et enregistre les données lorsque l'approche d'un train est détectée par des ponts de jauges collés sur les rails de part et d'autre du tronçon instrumenté. Ces ponts de jauges (Pont Q) permettent également de mesurer les charges aux essieux des trains en utilisant un algorithme développé par le service de mesure en voie de SNCF Réseau (DGII-VA-T3). L'enregistrement est arrêté quelques secondes après le passage du dernier essieu.

La chaîne de mesure a été conçue grâce aux retours d'expérience d'une expérimentation précédente (Yaba et al., 2020) qui était inspirée par des travaux réalisés en Australie (Anantanasakul et al., 2012) et en Slovénie (Lenart et Klompaker, 2014). Elle sera complétée par des mesures de

déflexion dynamique des rails et des traverses (déflexions au passage de trains), à des intervalles de quatre à six mois. Les caractéristiques des capteurs sont résumées dans le Tableau 1.

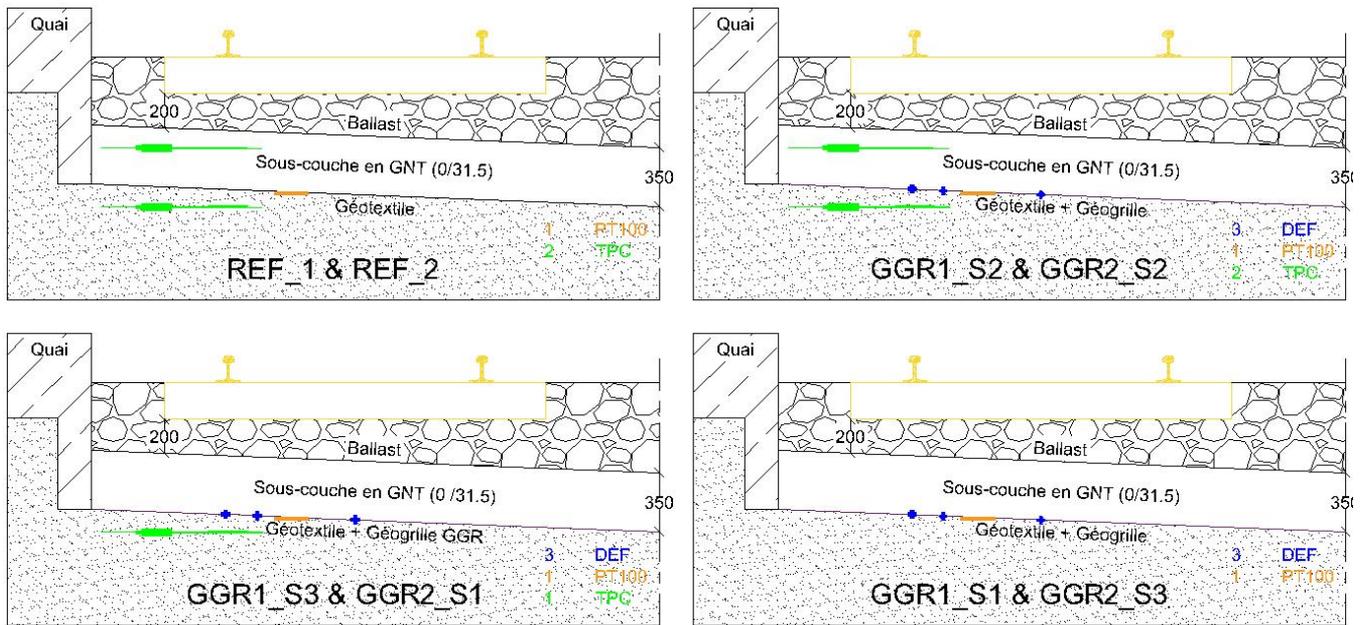


Figure 5. Coupes transversales des sections de mesure (valeurs en mm)

Les travaux sur le tronçon ont consisté à : 1) réaliser des déblais jusqu'à la cote -55 cm sous le niveau inférieur des traverses (NIT) futures; 2) niveler le fond de fouille en imposant une pente de 4% vers l'axe de la voie (drainage sur la voie connexe) ; 3) lisser le fond de fouille avec un compacteur de type Bomag BW75H ; 4) réceptionner le fond de fouille via des essais de portance; 5) dérouler un géotextile sur le fond de fouille et les géogrilles instrumentées sur le géotextile (en vérifiant l'alignement des sections de mesure); 6) réaliser une sous-couche en GNT 0/31,5 mm de 35 cm d'épaisseur (posée en deux couches de 20 cm et 15 cm respectivement) et compactée entre 97% et 100% de l'Optimum Proctor; 7) poser les composants de la voie (ballast, traverses et rail) et faire les travaux de finition.

Les travaux d'instrumentation ont dû être intégrés dans la méthodologie décrite ci-dessus. Pour réussir cette intégration, il a fallu travailler étroitement avec DGII-VA-T3, l'équipe de maintenance du réseau Bourgogne-Franche-Comté et l'entreprise travaux pour : 1) planifier les opérations durant les six mois qui ont précédé le chantier ; 2) faire livrer les géogrilles instrumentées et le reste du matériel sur site ; 3) monter la centrale d'acquisition pendant la dépose des composants de la voie ; 4) réaliser les essais de portance, creuser les tranchées et poser les cellules de pression totale dans le sol support, pendant la réception du fond de fouille; 5) dérouler le géotextile et les géogrilles instrumentées ; 6) acheminer les câbles dans des goulottes jusqu'à la centrale d'acquisition ; 7) poser les cellules de pression totale après le compactage de la première couche de GNT; 8) brancher l'ensemble des capteurs enterrés sur la centrale d'acquisition, pendant la pose des composants de la voie, et vérifier l'état de chaque capteur ; 9) installer les ponts de jauge après les opérations de bourrage et de réglage du ballast.

Ces travaux ont eu lieu en mars 2020, sauf la dernière étape qui a eu lieu en mai 2020 (après l'interruption des travaux dû au confinement imposé durant la crise de la Covid19). Des travaux de finition ont continué sur d'autres tronçons jusqu'à la réouverture de la ligne à la fin du mois de juillet 2020.

Tableau 1. Caractéristiques des capteurs utilisés

Type de capteur	Producteur	Désignation	Gamme de mesure	Précision	Résolution	Gamme de Températures
Jauge de déformation	Kyowa	KFGS-1N-120-C1-11 N15C2	±5%	0,02 µm/m	0,001 µm/m	-196 à +150 °C
Sonde de température	RS-Pro	Sonde PT100	-20 à +200 °C	±0,15 °C	0,01 °C	-20 à +200 °C
Cellule de pression totale	Telemac	TPC 229 mm	0 à 500 kPa	±1,25 kPa	0,05 kPa	-50 à +150 °C

3. Résultats préliminaires

L'instrumentation est prévue pour dix années, de manière à analyser l'évolution du comportement de chaque géogrille à long terme. Une analyse à long-terme permettra également de vérifier la stabilisation des deux zones équipées en géogrilles par rapport à la zone de référence et de déterminer l'influence de la raideur de chaque géogrille. Ainsi les résultats présentés ci-dessous, qui sont à très court terme, visent principalement à valider la chaîne de mesure plutôt que l'efficacité des géogrilles.

À la rédaction de cette communication, les passages d'environ mille trains ont été enregistrés. Dans la suite, les résultats seront illustrés par des figures représentant le passage du tout premier train, un TER autorail B 81500 4 caisses (Figure 6) circulant à environ 115 km/h. La convention géotechnique sera utilisée pour toutes les figures (extension négative et compression positive).



Figure 6. Autorail B 81500 4 Caisses

Sur la Figure 7, les colonnes de gauche et de droite correspondent à GGR1 et GGR2 respectivement. Chaque colonne est ordonnée par section de mesure S1, S2 et S3 de haut en bas. Pour rappel, à chaque section, les jauges sont numérotées (1, 2 et 3) de l'axe de la voie vers le rail extérieur (voir Figure 4). Notons que le train circule de gauche à droite (avec la référence d'orientation de la Figure 1).

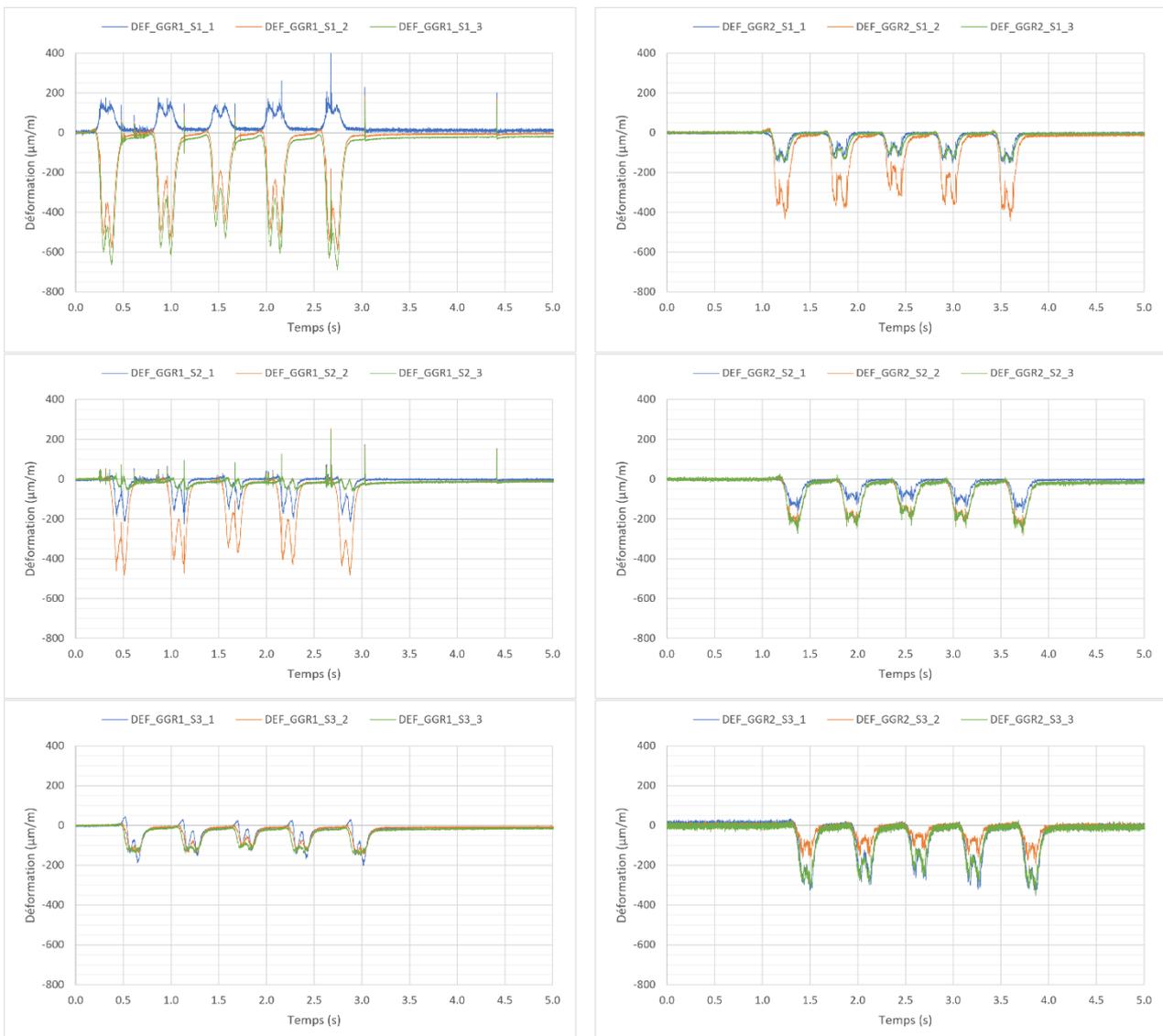


Figure 7. Déformations des géogrilles au passage d'un train (GGR1 à gauche et GGR2 à droite)

D'abord, on constate que les jauges de déformations mesurent bien les sollicitations dues au passage du train. Sur la Figure 7, on voit effectivement les pics d'extension de chaque brin instrumenté, provoqués par le passage de chaque essieu au-dessus du brin concerné. Toutes les valeurs sont d'un ordre de grandeur raisonnable vis-à-vis des caractéristiques des géogrilles (200 à 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$), sachant qu'une corrélation directe ne peut être faite parce que les déformations sont influencées par les effets dynamiques du passage.

On remarque que les signaux présentent beaucoup de bruit au début du tronçon (GGR1_S1 et GGR1_S2). Le signal à la fin du tronçon (GGR2_S3) présente aussi un peu de bruit. La première section (GGR1_S1) est particulièrement remarquable parce que les passages des essieux provoquent des compressions (du brin) dans l'axe de la voie. Ce comportement a été observé sur plusieurs trains. Sa cause n'a pas encore été clairement identifiée, mais il est vraisemblable que le comportement observé en début et en fin du tronçon puisse être dû aux transitions de la plateforme. En effet, le train passe d'une ancienne plateforme (matériaux originaux compactés) à la plateforme entièrement refaite (début du tronçon) puis à un passage à niveau refait (fin du tronçon). Cela pourrait engendrer des effets dynamiques qui perturbent les mesures.

La Figure 8 montre les surcharges mesurées dans la sous-couche (xxx_H, au-dessus de la géogrid) et dans le sol-support (xxx_B, en-dessous de la géogrid) lors du passage du train. Le décalage des signaux en fonction du temps pour les différentes sections de mesure, permet de vérifier le sens de circulation du train et de confirmer sa vitesse.

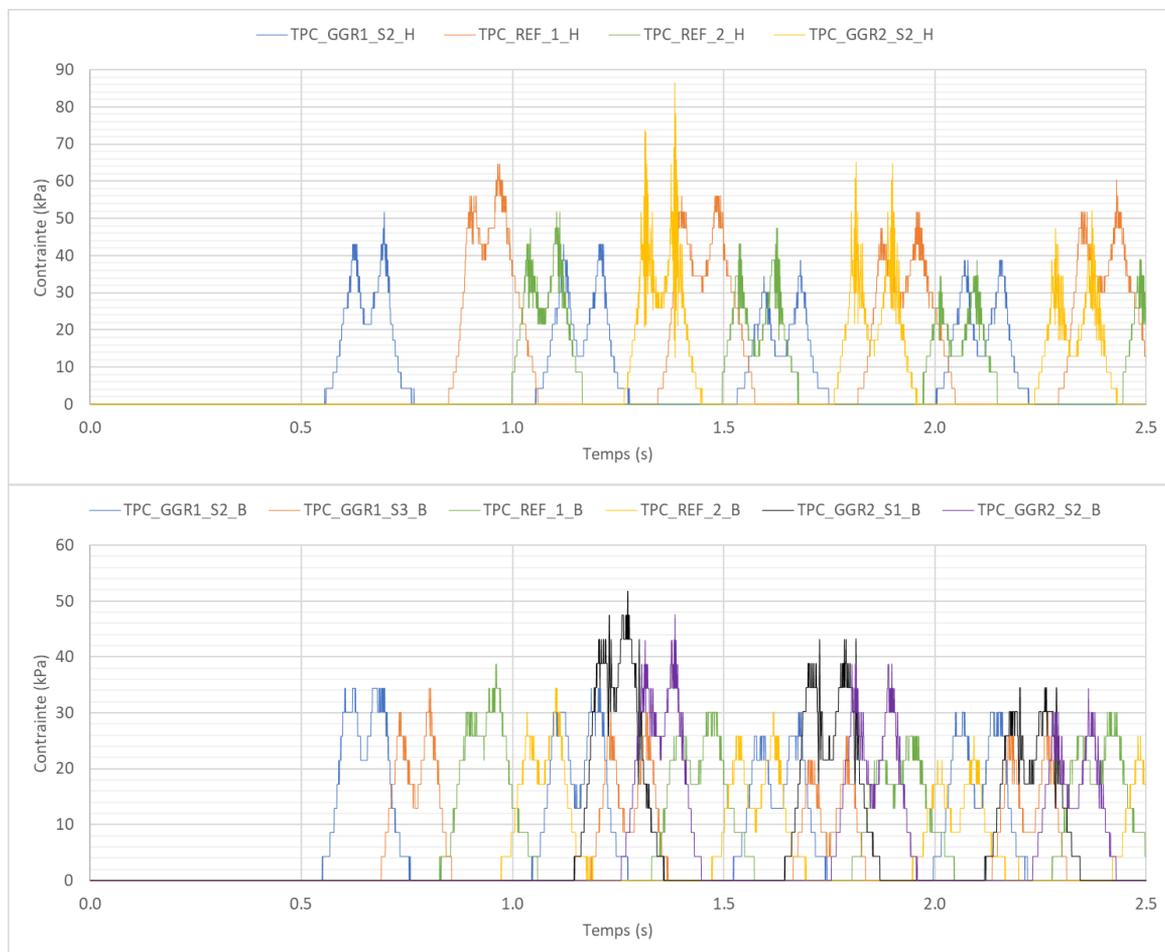


Figure 8. Variations des contraintes au-dessus (haut) et en-dessous (bas) des géogrilles

On remarque que, à chaque niveau, il n'y a pas de différence marquée entre les sections équipées de géogrid et les sections de référence. Les surcharges sont toutes dans l'ordre de grandeur attendu ; 50 à 100 kPa pour la sous-couche et 20 à 50 kPa pour le sol-support. Néanmoins, les sections GGR2_S1 et GGR2_S2 présentent quelques pics particulièrement élevés. En excluant les pics anormalement élevés (dans la zone GGR2) on obtient des pics moyens d'environ 55 kPa et 32 kPa dans la sous-couche et le sol-support respectivement. La cause des pics élevés pour dans la zone GGR2 n'est pas encore connue. Aucune hypothèse satisfaisante n'a été retenue lors de la rédaction de cette communication.

Pour les sections qui comprennent deux cellules de pression totale, les signaux générés par le premier bogie ont été nettoyés et recentrés pour aligner leurs pics (Figure 9). Cela facilite la visualisation du phénomène de dissipation de charge. Il pourrait être surprenant de constater que la dissipation semble plus prononcée aux sections de référence qu'aux sections équipées de géogrille, mais cela est normal. La présence d'une géogrille est censée réduire la contrainte verticale dans la sous-couche et augmenter la contrainte latérale en réduisant les déplacements latéraux (Perkins, 1999). Cependant, le taux élevé de bruit sur le signal TPC_GGR2_S2_H empêche d'affirmer cette supposition à l'heure de la rédaction de cette communication. Notons également que plusieurs milliers de cycles de chargement sont probablement nécessaires pour atteindre une mobilisation complète des géogrilles.

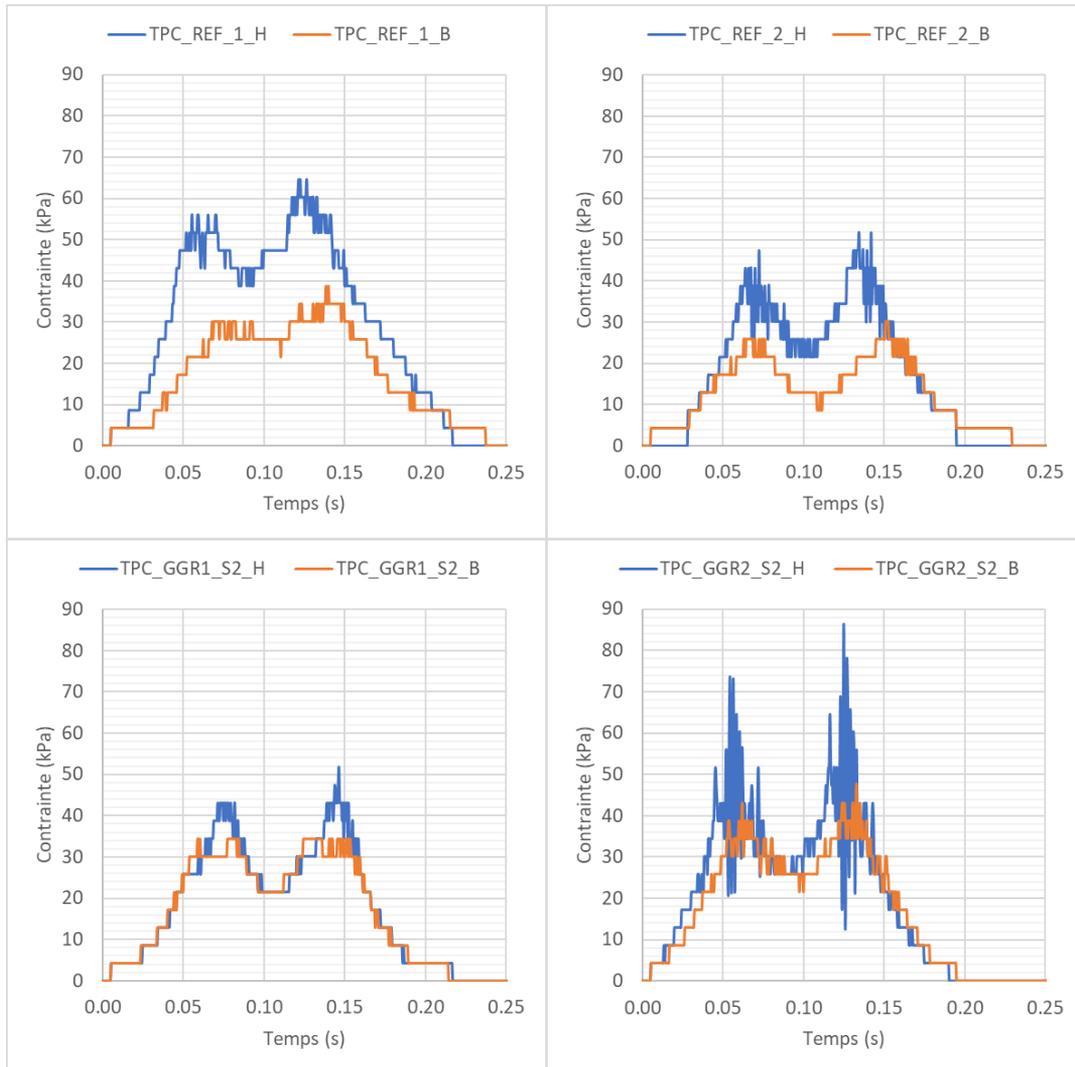


Figure 9. Comparaison des pics de contrainte sur les sections équipées de deux TPC

4. Conclusions

La mise en place de cette instrumentation a été un succès. Une analyse préliminaire des mesures a confirmé le bon fonctionnement de la chaîne de mesure. Il est désormais nécessaire d'effectuer une analyse approfondie des enregistrements (environ 30 Go de données brutes par mois) en appliquant des méthodes statistiques combinées avec les outils de la data science.

L'analyse des enregistrements durant les prochains mois fournira suffisamment de recul pour comprendre comment les géogrilles sont mobilisées aux passages des trains et comparer les performances des deux géogrilles. À long-terme, cette analyse permettra de statuer sur la pertinence de l'utilisation de géogrilles pour le renouvellement des plateformes ferroviaires, sur l'importance de leur rigidité pour cette application et sur la durée de service qu'on pourrait espérer.

5. Références bibliographiques

- Anantanasakul P., Indraratna B., Nimbalkar S., Neville T. (2012). Field monitoring of performance of ballasted rail track with geosynthetic reinforcement. 11th Australia - New Zealand Conference on Geomechanics: Ground Engineering in a Changing World (pp. 241-246). Melbourne: Australian Geomechanics Society and the New Zealand Geotechnical Society.
- Carroll R. (1988). Specifying geogrids. *Geotechnical Fabrics Report*, 6(2).
- European Organisation for Technical Approvals. (2017). Non-reinforcing hexagonal geogrid for the stabilization of unbound granular layers by way of interlock with the aggregate, Technical Report TR041, 25p. Brussels.
- Fernandes G., Palmeira E., Gomes R. (2008). Performance of geosynthetic-reinforced alternative sub-ballast material in a railway track. *Geosynthetics International*, 15(5), 311–321. doi:10.1680/gein.2008.15.5.311
- Horníček L., Břešťovský P., Jasans P. (2017). Application of geocomposite placed beneath ballast bed to improve ballast quality and track stability. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 236(1), pp. 012039. doi:10.1088/1757-899X/236/1/012039
- Lenart S., Klompmaker J. (2014). Geogrid reinforced railway embankment on soft soil – Experiences from 5 years of field monitoring. 10th International Conference on Geosynthetics. Berlin: IGS.
- Nimbalkar S., Indraratna B. (2016). Improved performance of ballasted rail track using geosynthetics and rubber shockmat. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142(8), 04016031-1 - 04016031-13.
- Perkins S. W., Edens M. Q. (2003). Finite element modeling of a geosynthetic pullout test. *Geotechnical and Geological Engineering*, 21(4), 357–375. <https://doi.org/10.1023/B:GEGE.0000006053.77489.c5>
- Rincent ND Technologies. (2017, Avril). Plaque dynamique légère Manuel d'utilisation, 30p. Courcouronnes, France.
- Sharpe P., Brough M., Dixon J. (2006). Geogrid trials at coppull moor on the west coast main line. *Railway Foundations. International Conference on Railway Foundations* (pp. 367-375). Railfound 6.
- Yaba O., Emeriault F., Jenck O., Ferelle J.-F., Dhemaied, A. (2020). Suivi in situ du comportement d'une géogrid dans une plateforme ferroviaire. 10èmes journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur. Lyon.