
Instrumentation de la LGV Bretagne – Pays de la Loire avec sous couche bitumineuse

Khairallah Diana¹

¹ Railenium, Valenciennes, diana.khairallah@railenium.eu

RÉSUMÉ. Les phénomènes de tassement et d'usure du ballast, sous sollicitations dynamiques, restent un problème important sur les voies à grande vitesse et conduisent à des fréquences et coûts de maintenance élevés. Pour atténuer le problème, il a été introduit sur la LGV BPL (Bretagne-Pays de Loire), une couche bitumineuse sous ballast, destinée entre autre à diminuer l'amplitude des accélérations produites au passage des rames TGV, ce qui est une cause majeure du tassement.

La LGV BPL comporte 105 km de voie innovante avec une sous couche en Grave-Bitume sous le ballast, et 77 km avec une sous-couche granulaire. Afin d'étudier les réponses dynamiques de ces différentes structures, deux sections avec sous couches granulaire et avec sous couche bitumineuse de la voie ont été instrumentées avec des accéléromètres, des sondes de températures et des capteurs de déflexion ancrés.

L'instrumentation de la voie et le système d'acquisition installé pour enregistrer toutes les mesures sont présentés dans ce papier, ainsi que les résultats de comparaison du comportement dynamique et mécanique des différentes structures pendant la phase de montée en vitesse dans des conditions contrôlées. La comparaison des différentes mesures montre que pour des valeurs de déflexion semblables, l'introduction d'une sous couche bitumineuse permet de réduire d'un facteur 2 les accélérations sous le ballast. Les deux structures ont ensuite été modélisées avec le logiciel ViscoRail. Les valeurs mesurées et calculées sont quasiment identiques.

ABSTRACT. The phenomena of packing and wear of ballast, under dynamic stresses lead to high frequencies and high costs of maintenance. To mitigate this problem, an innovative track structure, with an asphalt concrete layer under the ballast layer was built on the Bretagne-Pays de la Loire high-speed line (BPL HSL). It is intended, among other things, to reduce the amplitude of the accelerations produced at the passage of High Speed Trains (HST), major cause of ballast settlements. BPL HSL includes 105 km with a sub-layer in asphalt concrete under the ballast, and 77 km with a granular sub-layer. In order to study the dynamic responses of these different structures, four track sections were instrumented using, among others, accelerometers, strain gauges, temperature probes, etc.

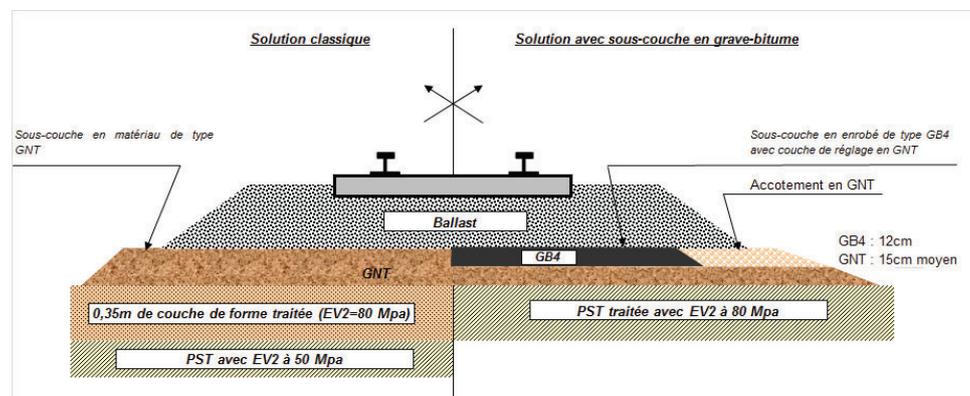
In this paper, we will present the tracks' instrumentation, the acquisition system installed to collect all the measurements, as well as comparison results of dynamic and mechanical behaviour between structures during the speed up test phase, under controlled conditions. The comparison of the different measurements shows that for similar deflection values, the introduction of a bituminous sub-layer makes it possible to reduce the accelerations under the ballast by a factor of two. Both structures were then modeled with ViscoRail software. The measured and calculated values are almost identical.

MOTS-CLÉS : voie ferrée ballastée, sous-couche bitumineuse, instrumentation, sous-couche granulaire, système d'acquisition.

KEY WORDS: ballasted railways, asphalt concrete, monitoring, granular underlayment, acquisition system.

1. Introduction

Dans le domaine des voies LGV (Ligne à Grande Vitesse) classiques (voies ballastées, avec sous couche en matériaux granulaires), il existe en France un retour d'expérience important, qui a permis d'améliorer les règles de conception [LAM 11]. Les phénomènes de tassement et d'usure du ballast, sous sollicitations dynamiques, restent cependant un problème important sur les voies à grande vitesse et conduisent à des fréquences et coûts de maintenance élevés. Plusieurs études ont montré que ces tassements étaient liés aux accélérations élevées produites dans le ballast par le passage des trains à grande vitesse [MAR 14]. Pour atténuer le problème, il a été proposé d'insérer une couche bitumineuse sous le ballast. La ligne à grande vitesse (LGV) Bretagne – Pays de la Loire est la première application à grande échelle en France de la nouvelle technique de sous couche bitumineuse, avec des conditions de plate-forme variées, et en utilisant une grave-bitume de performances plus élevées (GB4). 105 km de voie ont été construites avec une structure bitumineuse implantée sous ballast alors que les 77 km restant ont une sous-couche en matériaux granulaires (GNT). La Figure 1 présente la comparaison, pour la LGV BPL, de la solution classique de sous-couche en matériaux granulaires et la sous-couche ferroviaire en GB. Afin de comparer les réponses de ces différentes structures, deux sections, avec sous



couche granulaire et avec sous couche bitumineuse ont été instrumentées.

2. Instrumentation de la LGV BPL

2.1. Capteurs in-situ

Le choix des capteurs a été effectué par l'IFSTTAR, en s'appuyant sur son expérience dans le domaine de l'instrumentation routière. Sur les deux sections instrumentées (avec sous couche granulaire et avec sous couche bitumineuse) les capteurs suivants ont été mis en place :

- des accéléromètres, permettant de suivre le comportement dynamique de la voie, sont mis en place à plusieurs niveaux: sous les traverses, au sommet de la couche de grave-bitume et au sommet et à la base de la GNT.

- **Figure 1.** Structure classique granulaire et structure innovante bitumineuse de la LGV BPL

deux capteurs ancrés mesurent la déflexion totale entre le sommet de la sous-couche et un point de référence situé à 6 m de profondeur. Ces capteurs permettent de mesurer le déplacement total de la structure située sous le ballast.

- Des sondes de températures à la base et au sommet de la couche de GB et de GNT

2.2. Système d'acquisition

Les capteurs décrits ci-dessous sont reliés au système d'acquisition par des câbles. Les données de mesure sont ensuite transmises via un réseau 3G/4G vers un serveur distant. Toutes ces données sont stockées dans une base de données, permettant des recherches rapides et multicritères. Pour les 2 sections, les systèmes d'acquisition sont entièrement autonomes en électricité : l'alimentation se fait au moyen de panneaux solaires et de batteries.

Sur la base de ses performances et de son retour d'expérience, des systèmes d'acquisition basés sur la plateforme Pégase développée par l'IFSTTAR [LE CAM 10] ont été choisis.

3. Traitement des données

Au vu de la quantité importante de données enregistrées, il était indispensable de mettre en place des procédures d'automatisation du traitement des données. La programmation de différentes routines et fonctions permet l'obtention de la date et l'heure exacte du (des) passage (s) du train, le calcul des vitesses des TGV, le filtrage des signaux de capteurs à l'aide d'un filtre passe-bas et leur visualisation.

Ces mesures sont ensuite traitées par la méthode dite de "superposition des bogies porteurs". Sur la base des enregistrements réalisés, pour un capteur donné, aux passages de TGV à une vitesse connue, la procédure

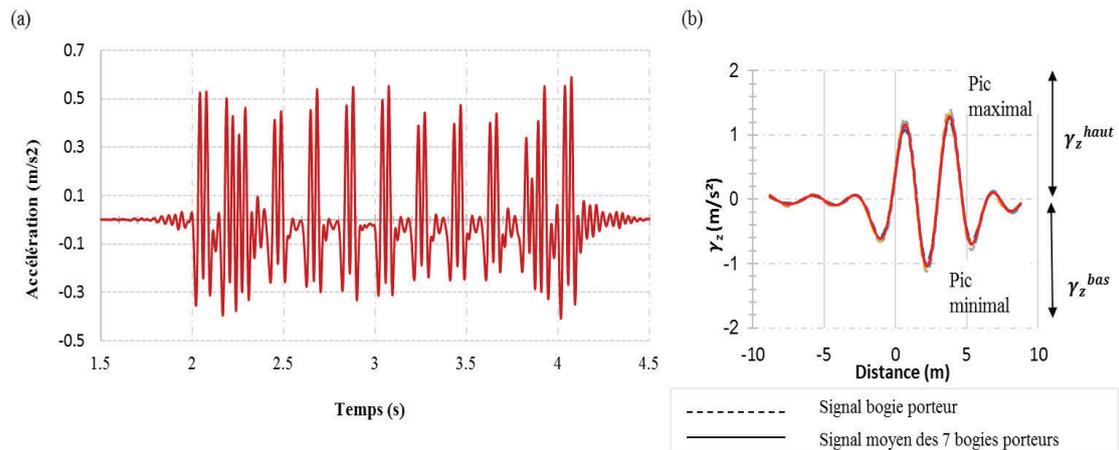


Figure 2 . (a) signal filtré d'accélération (b) superposition des signaux d'accélération des bogies porteurs et leur signal moyen

consiste à retracer, à partir d'une même origine de temps, les signaux provenant des passages de bogies porteurs (en omettant les bogies des moteurs des locomotives) par séquençage et translation temporelle du signal complet. Les mesures expérimentales peuvent ensuite être analysées statistiquement, pour un capteur donné, à partir du calcul de la courbe moyenne et des courbes situées à plus ou moins un écart type. Les valeurs maximales des courbes moyennes des passages sont retenues pour les comparaisons des réponses de structures. La Figure 2 (a) illustre le signal filtré d'un accéléromètre coupé pour isoler les séquences liées au passage des sept bogies porteurs et (b) la superposition des sept signaux et leur courbe moyenne. Ces étapes ont été programmées pour les 2 sections instrumentées.

Il est important de préciser que la phase de montée en vitesse a été réalisée entre novembre 2016 et janvier 2017. Les variations de températures étaient limitées. La température moyenne dans la couche de GB était de 7°C +/-1. Il est donc possible de comparer tous les signaux enregistrés durant cette période.

4. Résultats

L'un des objectifs du projet est d'évaluer le comportement des structures avec sous-couche en GB et de le comparer aux structures traditionnelles ayant des sous-couches granulaires. Pour atteindre cet objectif, les signaux moyens des capteurs de déplacement ancrés installés par paires sur les sections asphaltées et granulaires sont comparés, comme illustré dans la Figure 3, pour deux trains circulant à une vitesse de 320 km/h. Il est possible d'observer que les signaux de déflexion sur la section bitumineuse (courbes bleues et rouges) sont plus lisses avec seulement une légère diminution entre les deux pics, par rapport à la section granulaire (courbes grises et jaunes), où le décalage entre les deux pics est plus important. La sous couche bitumineuse semble donc amortir les déflexions dues aux passages des TGV.

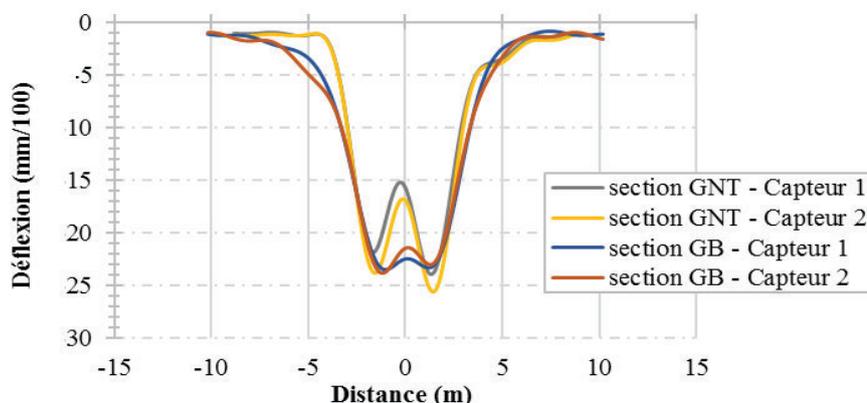


Figure 3. Comparaison des signaux moyens de déflexion de la section granulaire et la section bitumineuse

Les niveaux d'accélération sont ensuite analysés, en particulier ceux à la base de la couche de ballast, qui influencent fortement l'usure et les tassements de cette couche. La Figure 4 présente les accélérations dirigées vers le haut (positives) et vers le bas (négatives) déterminées à partir du signal moyen, pour les accéléromètres installés sous le rail extérieur pour les sections avec et sans sous couche bitumineuse. Les pics d'accélération au sommet de la sous-couche de GB en fonction des vitesses de TGV (A1, A3 et A5) sont de loin inférieurs à ceux mesurés au sommet de la sous-couche granulaire (AS2, AS4 et AS6). D'après ces résultats, il est donc possible de conclure que la présence d'une sous couche bitumineuse dans les structures ferroviaires entraîne une réduction significative (un facteur de deux) des accélérations sous le ballast. Une modélisation des deux structures a ensuite été réalisée avec le logiciel ViscoRail.

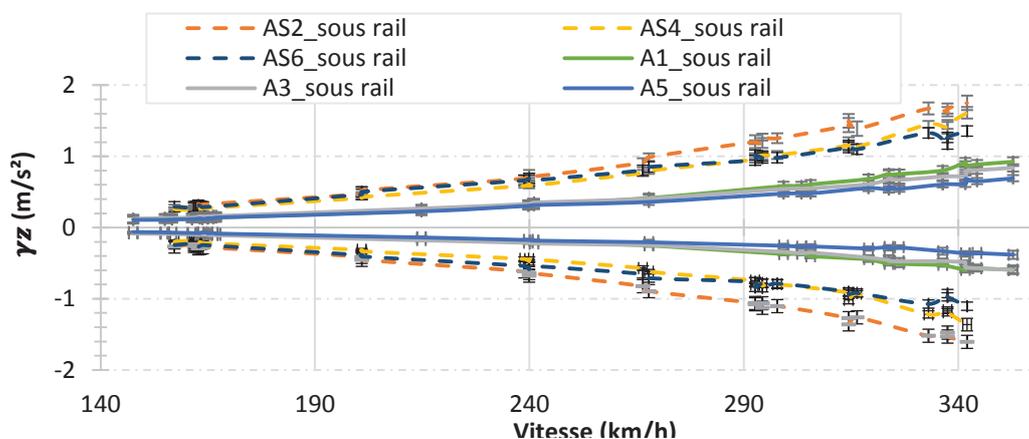


Figure 4. Comparaison des valeurs maximales des accéléromètres situés sous l'axe du rail pour tous les passages de train pour la section granulaire et la section bitumineuse

5. Calage des paramètres de structure avec ViscoRail

5.1. Introduction ViscoRail

ViscoRail [CHU 11] est un code de calcul semi-analytique dédié à la détermination de la réponse dynamique sous charges roulantes (à vitesse et amplitude de force constante) de structures ferroviaires. La méthode implémentée dans cet outil [CHU 11] étend l'approche quasi-stationnaire pour chaussées routières adoptée dans ViscoRoute© 2.0, [DHU 05] logiciel de calcul de la réponse dynamique sous chargement roulant de structures multicouches à comportement élastique linéaire isotrope (loi de Hooke) ou viscoélastique. ViscoRail transpose ce logiciel au cas des structures ferroviaires qui comportent un système d'armement reposant sur appuis discontinus. Dans ces modèles, les couches d'enrobés bitumineux sont représentées au travers de la loi

thermosensible viscoélastique de Huet-Sayegh [HUE 63] et les interfaces entre couches peuvent être collées ou parfaitement glissantes.

Plus précisément, la méthode de calcul implémentée dans ViscoRail est basée sur une procédure de sous-structuration du modèle de voie en section courante. Elle consiste à prendre séparément en compte au départ le système d'armement rails/traverses, modélisé par des poutres d'Euler-Bernoulli et des ressorts verticaux, de la structure d'assise (ou structure de voie). La liaison entre ces deux sous-systèmes est alors réalisé par le biais de la distribution de pression $p(x,t)$ sous traverses (en surface de structure d'assise), résultant du transfert de charge via le système d'armement. Une méthode itérative est mise en place pour faire converger $p(x,t)$ d'une valeur initiale vers la distribution de chargement correspondant au système global couplé. La réponse mécanique de la structure d'assise vis-à-vis du chargement $p(x,t)$ est calculée à l'aide du logiciel ViscoRoute© 2.0 après décomposition de $p(x,t)$ en « ondes de chargement » continues permettant une résolution quasi-stationnaire pour chaque onde. La réponse finale est obtenue par recombinaison des contributions individuelles de chaque onde. Les résultats en sortie de ViscoRail permettent de tracer les évolutions spatiales et temporelles des champs mécaniques dans la structure (déplacements, accélérations, déformations, contraintes, etc.) pour tout plan horizontal situé à une cote z donnée.

5.2. Calage des deux structures instrumentées sur la LGV BPL

L'application du modèle aux structures de la LGV BPL nécessite le calage inverse d'un certain nombre de paramètres non mesurés sur site (ex. module d'Young de la GNT ou du sol...). Pour ce faire, nous avons recherché dans un premier temps un jeu de données permettant de bien approcher l'ensemble des mesures (déflexion, déformation et accélération aux différentes cotes) pour les deux vitesses de passage $V = 160$ et 320 km/h. On obtient le jeu de paramètres initial suivant : $E_{ballast}^{ini} = 150$ MPa, $E_{GNT}^{ini} = 700$ MPa, $E_{Pa} = 160$ MPa, $E_{sol}^{ini} = 160$ MPa. Dans un second temps, ces valeurs sont affinées par le calcul de la matrice de sensibilité de la réponse dynamique de la structure à ces paramètres au voisinage du jeu de données initial. Le calcul est effectué pour la vitesse $V = 160$ km/h (exemple *Tableau 1* pour la section granulaire). La matrice obtenue est utilisée pour diminuer les écarts entre les mesures et les résultats du jeu de données initial en ne retenant que les grandeurs les plus répétables au passage des trains : déflexion, accélération et déformation verticale en sommet de GNT.

Tableau 1 – Matrice de sensibilité relative de la réponse de la section avec sous couche granulaire à $V=160$ km/h au voisinage du jeu de paramètres initial (ex. $\frac{\Delta_{déflexion}}{\Delta E_{sol}^{ini}} = -0.89$)

Déflexion	-2%	-3%	-5%	-89%	2%	1%
Accélération traverse	-66%	-11%	-8%	-13%	53%	-34%
Accélération sommet GNT mi- rails	-5%	-17%	-28%	-38%	28%	26%
Accélération sommet GNT sous rails	-5%	-27%	-27%	-40%	34%	-11%
Accélération base GNT	-6%	-15%	-31%	-48%	28%	-5%
Déformation verticale	2%	-125%	-14%	41%	24%	-74%

Ceci conduit à l'écriture du système d'équations ci-dessous où les termes inconnus sont les corrections à apporter aux paramètres du modèle.

$$\begin{aligned} & \text{---} \text{---} \text{---} \text{---} \text{---} \\ & \text{---} \text{---} \text{---} \text{---} \text{---} \\ & \text{---} \text{---} \text{---} \text{---} \text{---} \end{aligned}$$

La résolution de ce système surdéterminé est effectuée par méthode des moindres carrés et conduit aux valeurs de paramètres du Tableau 2. Par ailleurs, la rigidité k de la liaison entre rail et structure de voie est trouvée égale à 100 MN. La valeur du module de sol reste inchangée par rapport à sa valeur initiale. Les calculs montrent que ce nouveau jeu de paramètres est satisfaisant pour les deux vitesses considérées.

Tableau 2. *Caractéristiques géométriques et mécaniques du modèle de voie à structure granulaire*

	($kg.m^{-3}$)	(MPa)	(m)
Ballast			
Sous-couche GNT			
Couche de forme		0.4	0.35
Sol		0.4	6
Substratum			

Ce même jeu de paramètres est repris pour la modélisation de la section bitumineuse. Une couche de GB4 est simplement insérée sous la couche de ballast. Sa loi de comportement découle d'essais de module complexe effectués sur GB4 en laboratoire et est introduite sous forme du modèle de Huet-Sayegh (Tableau 3). Les calculs présentés ci-après sont effectués pour une température de 7°C dans la couche de GB4 correspondant à la température moyenne enregistrée durant la phase de montée en vitesse.

Tableau 3. *Paramètres de Huet-Sayegh pour la couche en grave bitume*

E_{∞} (MPa)	E_{∞} (MPa)	k	h	δ	τ_0 (s)	A_1 ($^{\circ}C^{-1}$)	A_2 ($^{\circ}C^{-2}$)
32655	11	0.193	0.592	2.244	18.973	-0.397	0.00195

5.3. Validation des résultats de calcul de ViscoRail avec mesures réelles

Les mesures issues des sections avec sous couche granulaire ou bitumineuse sont comparées ici avec les simulations ViscoRail effectuées pour quatre vitesses de circulation différentes : $V = 160, 240, 320$ et 350 km/h. Les calculs sont réalisés pour le bogie courant à deux essieux espacés de 3m et chargés à 160kN chacun (80kN par roue). Les évolutions temporelles des divers champs mécaniques sont restituées pour quatre ensembles de positions périodiques x_{Fi} prises le long de la voie : $x_{F1} = \{0 + n \times 0.6m\}$,

$x_{F3} = \{0.30m + n \times 0.6m\}$, $x_{F4} = \{0.45m + n \times 0.6m\}$ avec $n \in \mathbb{Z}$ (Figure 5). Dans les comparaisons ci-dessous effectuées avec les n... évolutions temporelles calculées sont retenues.

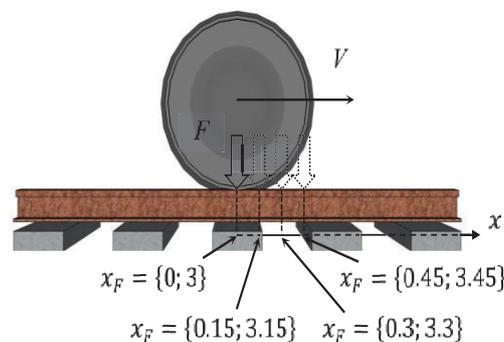


Figure 5. *Positions de charges considérées (x), utilisées pour le calcul des évolutions, l'origine des abscisses étant prise en milieu de traverses.*

La Figure 6 montre les valeurs maximales de déflexion mesurées et calculées pour les 4 vitesses pour la section granulaire. On obtient un bon accord dans tous les cas, le modèle reflétant en particulier la faible variation de la déflexion avec la vitesse.

La Figure 7 illustre la comparaison entre les mesures accélérométriques enregistrées en axe de voie au sommet de la couche granulaire et les accélérations calculées pour cette même position. On constate également une bonne correspondance entre mesures et modèle.

Les Figure 8 et Figure 9 reprennent les comparaisons précédentes dans le cas de la section bitumineuse. On observe pareillement une bonne adéquation des courbes expérimentales et calculées. Le logiciel ViscoRail permet de bien rendre en compte de la diminution d'un facteur 2 des accélérations sous ballast liée à l'introduction de la couche bitumineuse.

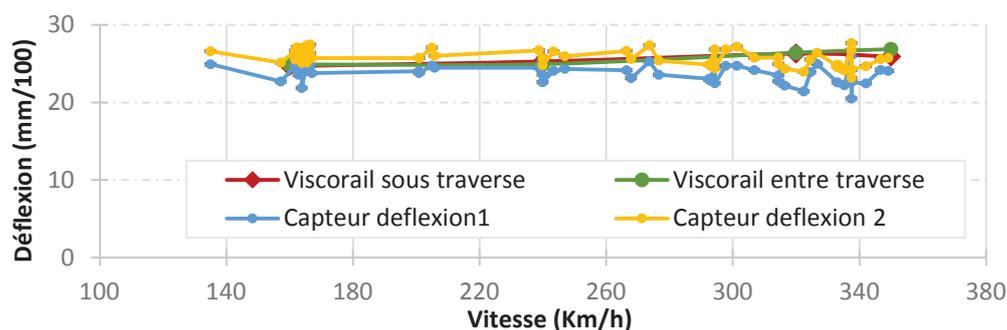


Figure 6. Comparaison des valeurs maximales de déflexion mesurées et calculées avec ViscoRail pour la section granulaire (Nota : la position précise des capteurs de déflexion par rapport au travelage est inconnue)

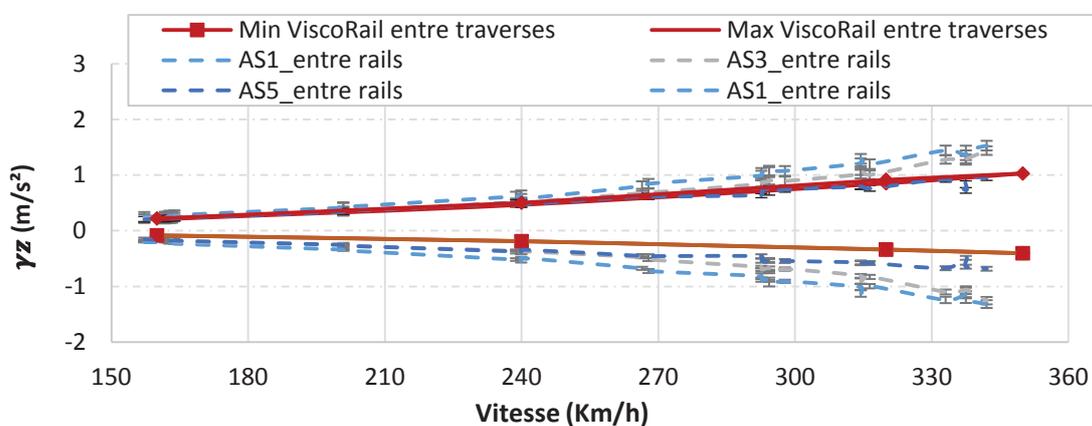


Figure 7. Comparaison des valeurs maximales des accélérations mesurées et calculées entre les rails pour la section granulaire (convention : accélérations comptées positivement vers le haut)

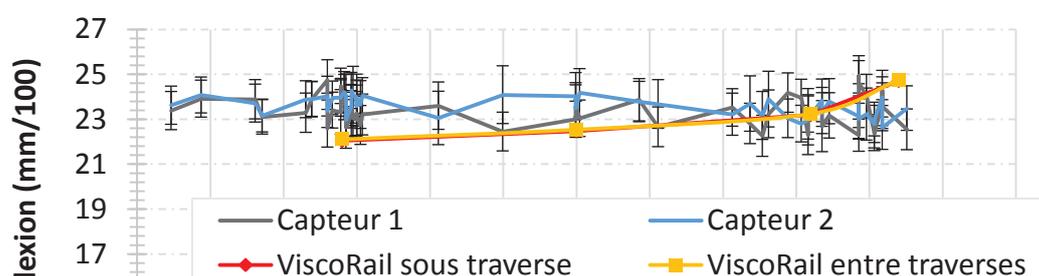


Figure 8. Comparaison des valeurs maximales de déflexion mesurées et calculées avec ViscoRail pour la section bitumineuse

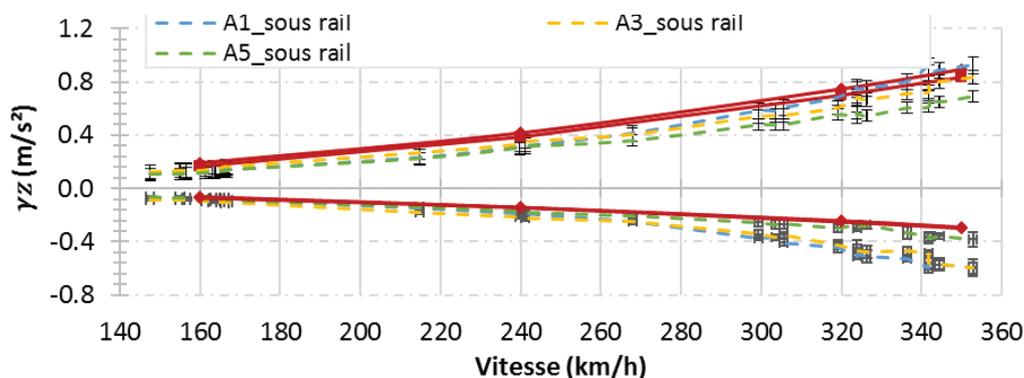


Figure 9. Comparaison des valeurs maximales des accéléromètres situés sous l'axe du rail pour la section bitumineuse et ceux du calcul ViscoRail

6. Conclusion

L'instrumentation de deux sections de la LGV BPL, avec sous couche granulaire et sous couche bitumineuse, a permis de montrer que l'introduction d'une sous couche bitumineuse permettait de réduire d'un facteur deux les accélérations sous ballast. Les deux sections instrumentées ont été modélisées à l'aide du logiciel ViscoRail. Le calage inverse des paramètres du modèle, non mesurés sur site, conduit pour les deux structures et l'ensemble des vitesses à une bonne adéquation entre observations expérimentales et résultats de calcul.

7. Bibliographie

[CHU 11] CHUPIN O., PIAU J-M., « Modélisation de la réponse dynamique d'une structure ferroviaire multicouche sous chargement roulant », 2011, p. 6p.,

[DHU 05] DUHAMEL, D., CHABOT, A., TAMAGNY, P., HARFOUCHE, L., « "ViscoRoute": Viscoelastic modeling for asphalt pavement », *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 2005, p. 89–103.

[HUE 63] HUET, C., « Etude par une méthode d'impédance du comportement viscoélastique des matériaux hydrocarbonés », Université de Paris, 1963.

[LAM 11] LAMBERT L., LE DIZES H., ROBINET A., TALFUMIERE V., « 40 lat doświadczenia w budowie linii dużych prędkości. Planowanie tras, podłoże i hydrotechnika: praktyka, wytyczne i rozwój », *Zesz Nauk-Tech Stowarzyszenia Inż Tech Komun W Krakowie Ser Mater Konf.*

[LE CAM 10] LE CAM V., LE MARCHAND L., MARTIN W., BONNEC N., « Improving wireless sensor behavior by means of generic strategies », *Struct Health Monit.*, vol. 1, n° 1, 2010, p. 696–703.

[MAR 14] MARTIN A., « Analyse numérique de la réponse dynamique de structures ferroviaires. Application à la réduction des désordres géométriques induits dans les couches de ballast des Lignes à Grande Vitesse », 2014.