

Smartvia® Track SEA

Instrumentation de la Ligne à Grande Vitesse Sud Europe Atlantique

A. MARTIN^a, K. BERRADA^a, B. POUTEAU^a

a. Eurovia Management, Centre de Recherche - antoine.martin@eurovia.com

Résumé

Afin d'étudier le comportement dynamique des voies ferroviaires, le projet Smartvia® Track SEA, consistant à instrumenter deux sections (avec sous-couche en GNT ou en GB) de la nouvelle Ligne à Grande Vitesse Sud Europe Atlantique, a été lancé par le centre de recherche et la filiale de travaux ferroviaires d'Eurovia. L'instrumentation de ces deux sites s'est déroulée en parallèle des travaux d'avancement du chantier de construction de la voie. Cet article résume les différentes étapes de ce projet et donne quelques exemples de résultats de mesures, effectuées lors des essais de montées en vitesse (comprise entre 160 et 352 km/h).

Abstract

In order to study the dynamic behavior of railway tracks, the Smartvia® Track SEA project has been launched by both the research center and the railway subsidiary of Eurovia. This project consists of instrumenting two sections (with granular or bituminous sublayer) of the new High Speed Line Sud Europe Atlantique. The instrumentation of those two test sites has been performed in parallel with the construction progress of the line. This article summarizes the different stages of this project and gives some examples of measurements results carried out during the speed tests (between 160 and 352 km/h).

Mots clefs : Smartvia® Track, Instrumentation, Ligne à grande vitesse, Comportement mécanique dynamique, Infrastructures ferroviaires, Retour d'expérience.

1 Introduction

En France, le dimensionnement des voies ferroviaires repose en grande partie sur les connaissances empiriques rassemblées au fil des années et des projets de développement du réseau ferré. Afin d'optimiser ce dimensionnement, une des ambitions de la communauté scientifique est de mieux comprendre, notamment sous les circulations réalisées à grande vitesse, le comportement thermomécanique des voies ferroviaires ; en particulier celles incluant des sous-couches bitumineuses dont l'utilisation sur les nouvelles LGV semble se généraliser en France [1-2]. Si de nombreux travaux

sont connus et publiés sur des modélisations expérimentales et/ou numériques du comportement dynamique des infrastructures ferroviaires, le déficit de retours d'expérience quantifiés sur leur comportement in situ freine la mise en place d'une approche de dimensionnement mécanistique des voies ferroviaires.

Les travaux de recherches présentés ici sont relatifs au projet Smartvia® Track SEA, consistant à instrumenter deux sections de la Ligne à Grande Vitesse Sud Europe Atlantique (LGV SEA), avec sous-couche granulaire classique (GNT) ou en grave-bitume (GB). L'objectif de ce projet est de suivre et d'analyser le comportement thermomécanique de ces deux sections au passage des différentes circulations (durant les essais de montées en vitesse + éventuellement la 1^{ère} année d'exploitation). En particulier, il s'agira de quantifier l'apport de la GB vis-à-vis des performances mécaniques de la voie, par comparaison avec la structure classique, et d'étudier l'influence de la vitesse de circulation ; dont les plus élevées (supérieures à 300 km/h) suggèrent la prise en compte de nouveaux critères de dimensionnement, notamment en lien avec les accélérations dans le ballast [3-5].

Cet article résume les différents travaux menés dans le cadre du projet Smartvia® Track SEA et dresse un bilan du projet à la suite des premières circulations réalisées. Quelques exemples de résultats de mesures sont également donnés en fin de document. Avant cela, le concept Smartvia® Track est rapidement présenté.

2 Smartvia® Track : concept général

Le concept Smartvia®, développé au Centre de Recherche d'Eurovia depuis 2010, est un outil de diagnostic et de suivi automatisé du comportement thermomécanique des infrastructures de transport. Ce dispositif, essentiellement appliqué à l'étude des chaussées routières jusqu'à présent, a déjà fait ses preuves sur bon nombre de sites expérimentaux [6-8]. On présente rapidement ici le principe de fonctionnement de sa déclinaison pour les applications ferroviaires : Smartvia® Track.



Figure 1. Illustration du principe de fonctionnement du dispositif Smartvia® Track.

Tel qu'illustré sur la Figure 1, le dispositif Smartvia® Track permet :

- Par une instrumentation permanente des différents niveaux de la structure, la mesure des grandeurs thermomécaniques permettant la caractérisation de son comportement in situ (température, humidité, accélération, déformation, pression, etc.) ;

- Par des systèmes électroniques *ad hoc*, le déclenchement automatique sur évènement (ou sur demande) des mesures avec horodatage au passage des différentes circulations et la collecte des données à des fréquences d'échantillonnage adaptées aux différentes grandeurs mesurées ;
- Par une suite logicielle, la transmission par réseau 3G/4G et le stockage en temps réel de ces données sur serveur sécurisé et accessible en ligne pour leur visualisation et leur exploitation.

Ces deux derniers points permettent par ailleurs de limiter les déplacements sur site, relatifs à l'acquisition et à la récupération des données de mesures et source d'exposition à de nombreux risques de différentes natures (liés aux circulations routières et ferroviaires, aux installations électriques sur voie, à la météorologie, etc.).

Smartvia® Track, dont le champ d'application peut s'étendre à tous les types de voies ferroviaires (tramway, métro, voie secondaire, voie de fret, etc.), est illustré plus en détails dans la suite au travers de son application sur la LGV SEA qui constitue le premier terrain d'investigation de ce dispositif.

3 Présentation du projet Smartvia® Track SEA

Comme évoqué en introduction, le dispositif Smartvia® Track a été installé sur deux sections de la nouvelle LGV SEA, situées sur le tronçon Angoulême-Bordeaux (Figure 2). Le premier site, localisé au point kilométrique (pk) 234, présente une structure classique avec sous-couche granulaire en GNT alors que le second, localisé au pk 284, possède une sous-couche en GB. Hormis ces différences structurelles, ces deux sections ont été choisies de manière à être les plus comparables possibles par ailleurs (alignement, déclivité, trafic, vitesse de circulation, conditions météorologiques, etc.).

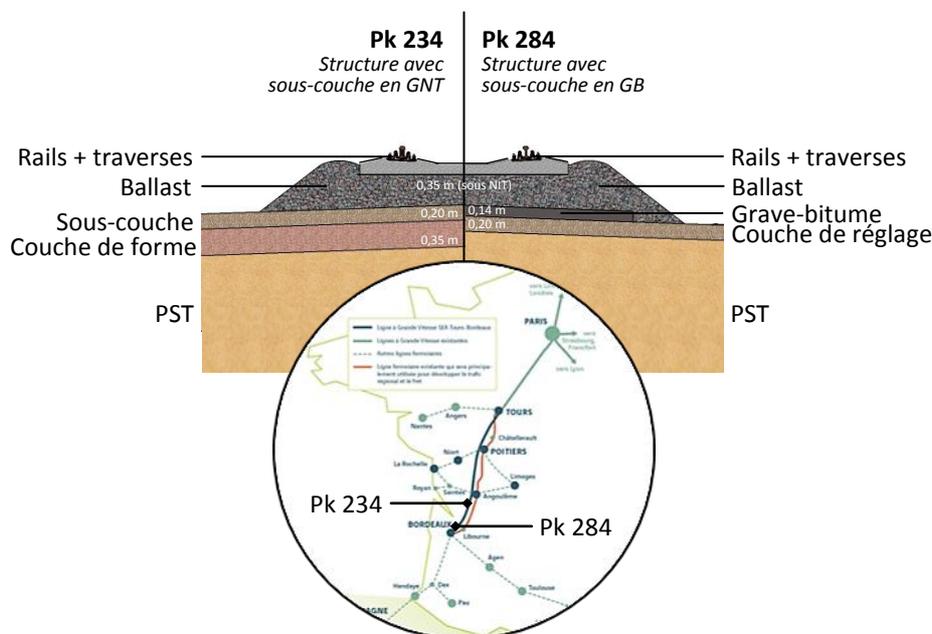


Figure 2. Localisation et structures schématiques des deux sections instrumentées dans le cadre de Smartvia® Track SEA.

Afin d'apporter l'éclairage le plus complet possible sur le comportement thermomécanique de chaque type de structure et de pouvoir les comparer, l'instrumentation des différents niveaux de la voie sur les deux sections est similaire (hors GB) et se compose de 61 capteurs. L'instrumentation de la couche de GB sur le pk 284 se compose quant à elle de 36 capteurs supplémentaires ; portant le nombre total de capteurs installés à 158 (redondance comprise afin de limiter les risques d'endommagement irréversible de certains capteurs/connectiques).

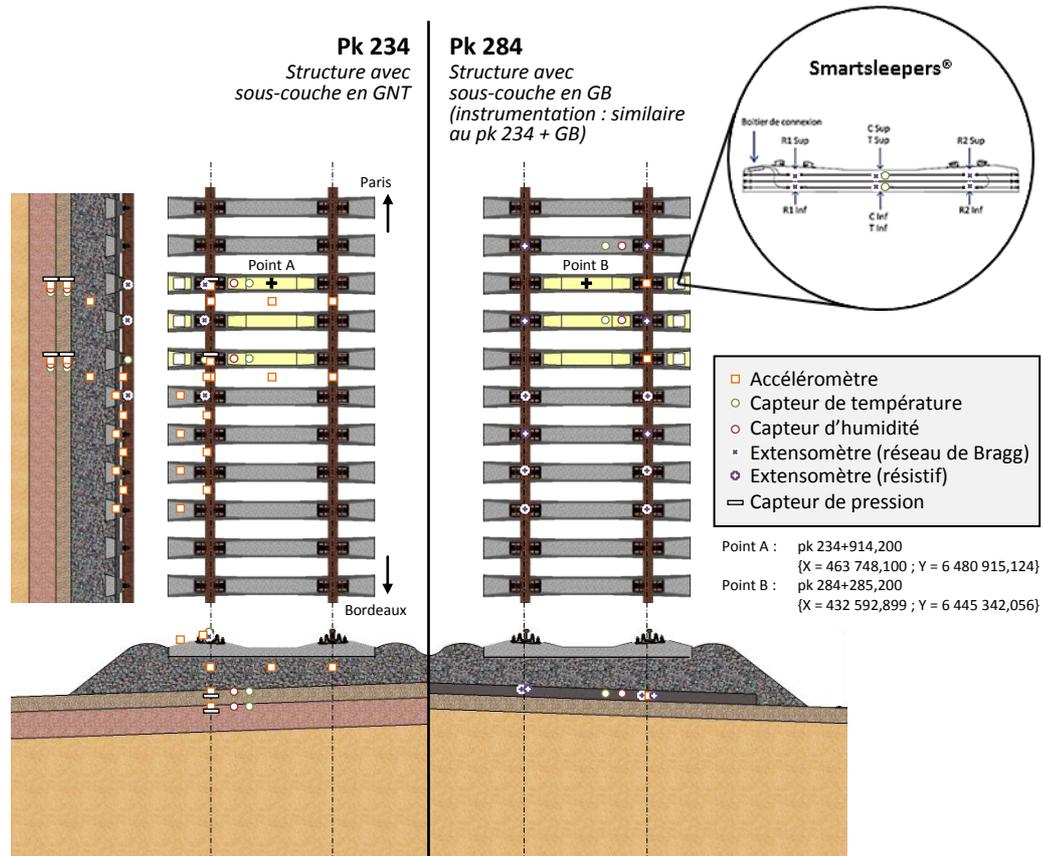


Figure 3. Schéma illustratif de l'instrumentation sur chacun des deux sites instrumentés dans le cadre de Smartvia® Track SEA (Instrumentation du pk 284 : similaire à celle du pk 234 + instrumentation de la GB).

Tel qu'illustré sur la Figure 3, la répartition des capteurs est la suivante :

- Extensomètres pour mesurer les déformations mécaniques :
 - sur l'âme des rails (ligne optique à réseau de Bragg, afin d'éviter les contraintes liées aux retours de courant du rail dans les connectiques métalliques),
 - au sein des traverses par le biais des Smartsleepers® (traverses instrumentées par des lignes optiques à réseau de Bragg et développées par la société Sateba),
 - en base de grave-bitume au pk 284 (jauges résistives + ligne optique à réseau de Bragg, pour valider les modalités de dimensionnement de cette couche vis-à-vis des déformations horizontales) ;
- Sondes de températures afin d'évaluer les variations thermiques des différents constituants de la voie (notamment des rails et de la grave-bitume dont le comportement est thermosensible) ;

- Capteurs d'humidité dans les couches d'assises afin de mesurer leur teneur en eau (qui influe sur leurs performances mécaniques) et d'évaluer le caractère *a priori* isolant de la GB ;
- Accéléromètres pour quantifier le comportement dynamique de la voie et son atténuation dans les niveaux inférieurs de la structure (et leurs différences entre sections avec GNT ou GB) :
 - o sur le patin des rails et la surface supérieure des traverses (acc. 1D vertical $\pm 25g$),
 - o dans le ballast à environ 15 cm sous la surface inférieure des traverses (acc. 3D $\pm 10g$),
 - o en base de grave-bitume et proche de la surface des couches d'assises (acc. 1D vertical $\pm 10g$) ;
- Capteurs de pression proches de la surface des couches d'assise afin de quantifier les contraintes de compression verticale en surface de plateforme et d'apporter des éléments de compréhension sur la descente de charge au sein des deux types de structures instrumentées.

4 Réalisation de l'instrumentation Smartvia® Track SEA

La réalisation du chantier d'instrumentation Smartvia® Track SEA s'est déroulée entre avril 2015 et août 2016, en parallèle de l'avancement des travaux de construction de la ligne. Les différentes étapes de ce chantier sont rapidement présentées ici.



Figure 4. Photographies illustrant les travaux d'instrumentation de l'infrastructure de la voie.

L'instrumentation des couches d'assise (respectivement couche de forme + sous-couche pour le pk 234 et PST + couche de réglage pour le pk 284) et de grave-bitume (pk 284) a été effectuée entre avril et juillet 2015. Telle qu'illustrée sur la Figure 4 (photographies a et b), la technique de pose des capteurs dans l'assise a consisté à installer ces derniers dans de fines tranchées réalisées au préalable en surface de couche, puis à valider leurs positions définitives (vérification de la planéité, relevés

topographiques et repositionnement éventuel) avant recouvrement par le matériau excavé et mise en œuvre du niveau structural suivant. En ce qui concerne la grave-bitume (photographies c et d), le positionnement des capteurs en surface de couche de réglage a tout d'abord été effectué et contrôlé comme précédemment (planéité, relevés topographiques et repositionnement éventuel). Les différents nœuds de mesure ont ensuite été recouverts « à la main » par de la grave-bitume afin d'une part de figer leur position et d'autre part d'assurer leur protection lors du passage du finisseur.

L'instrumentation du ballast, des traverses et des rails ainsi que la pose des traverses instrumentées Smartsleepers® a été effectuée d'avril à août 2016 (Figure 5). On peut souligner que l'installation de ces traverses a été opérée manuellement (par substitution des traverses existantes) par les équipes de SEA, spécialisées dans la pose de traverses sur sections délicates, afin de limiter tout risque d'endommagement de ces traverses lié à leur manipulation par des engins. Les accéléromètres situés dans la couche de ballast ont été installés par excavation du ballast jusqu'à 15 cm sous la surface inférieure des traverses adjacentes et leur position vérifiée comme précédemment (photographies a). L'installation des capteurs sur les rails et les traverses s'est effectuée après nettoyage des surfaces de collage (photographies b et c).



Figure 5. Photographies illustrant les travaux d'instrumentation de l'armement et de génie civil.

En parallèle de ces opérations d'instrumentation, des travaux de génie civil ont été programmés fin mai 2016 sur chacune des deux sections afin de réaliser la dalle béton destinée à accueillir les systèmes d'alimentation (groupe électrogène, coffres de stockage et de suivi des batteries) et les armoires d'acquisition (Figure 5, photographie d).

5 Bilan et premiers résultats

La mise en service de LGV SEA a été réalisée en septembre 2016 afin de procéder aux essais de montées en vitesse, programmés jusqu'en février 2017 et durant lesquels plus de 50 circulations ont été opérées à des vitesses comprises entre 160 et 352 km/h sur chaque section instrumentée. Pour chacune de ces circulations et en plus de la vitesse, la composition géométrique des trains d'essais ainsi que leur charge à l'essieu sont également connues et permettront une analyse fine des résultats de mesures.

Durant ces essais, le dispositif Smartvia® Track a permis de recueillir les données de mesures de plus de 90 % des circulations ainsi planifiées sur chacun des sites instrumentés ; représentent au total plus de 2 Go de données à traiter. L'observation des signaux de mesure montre par ailleurs un taux de capteurs fonctionnels d'environ 80 %, ce qui est relativement satisfaisant compte tenu des différentes difficultés rencontrées au cours de la réalisation du projet malgré toutes les précautions prises (arrachements de connectiques, capteurs défectueux, etc.)

A titre d'exemple, un signal de pression verticale (normalisé), mesuré dans la couche de forme au pk 234 le 14/12/2016 à 15:06:42 au passage d'un Train à Grande Vitesse (TGV) d'essai à 352 km/h, est montré sur la Figure 6. On constate que le passage de chaque essieu de ce TGV est parfaitement identifiable sur le graphique (cf. profil du TGV au-dessus de la courbe). Une photographie du TGV en question, prise lors de l'évènement par le dispositif Smartvia® Track, est également donnée.

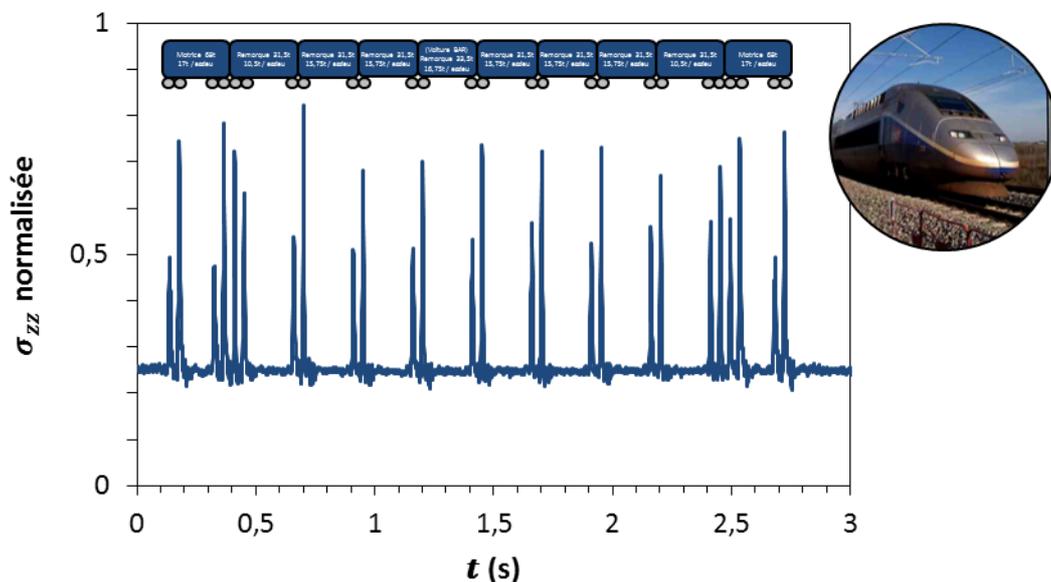


Figure 6. Exemple de signal mesuré : pression verticale normalisée dans la couche de forme au pk 234 lors du passage d'un TGV à 352 km/h (enregistré le 14/12/2016 à 15:06:42).

L'étude des données de mesures recueillies lors de ces montées en vitesse est en cours au Centre de Recherche d'Eurovia et permettra d'apporter un certain nombre d'éléments de réponse sur les thématiques évoquées en introduction, notamment vis-à-vis des performances de la GB. D'ores et

déjà, les premières analyses semblent confirmer l'influence de la vitesse de circulation sur les différentes grandeurs mécaniques mesurées.

A titre d'illustration, la Figure 7 propose une comparaison des signaux mesurés moyens de bogie (2 essieux) liés au passage du TGV d'essai à 352 et 160 km/h : (a) contrainte verticale normalisée dans la sous-couche au pk 234, (b) accélération verticale normalisée dans la couche de ballast au pk 284. Le calcul du signal moyen d'un bogie au passage d'un TGV est réalisé sur la base de la méthode dite de cumul des bogies porteurs (hors motrices) en superposant les signaux de tous les bogies porteurs et en recherchant le maximum de vraisemblance entre les signaux.

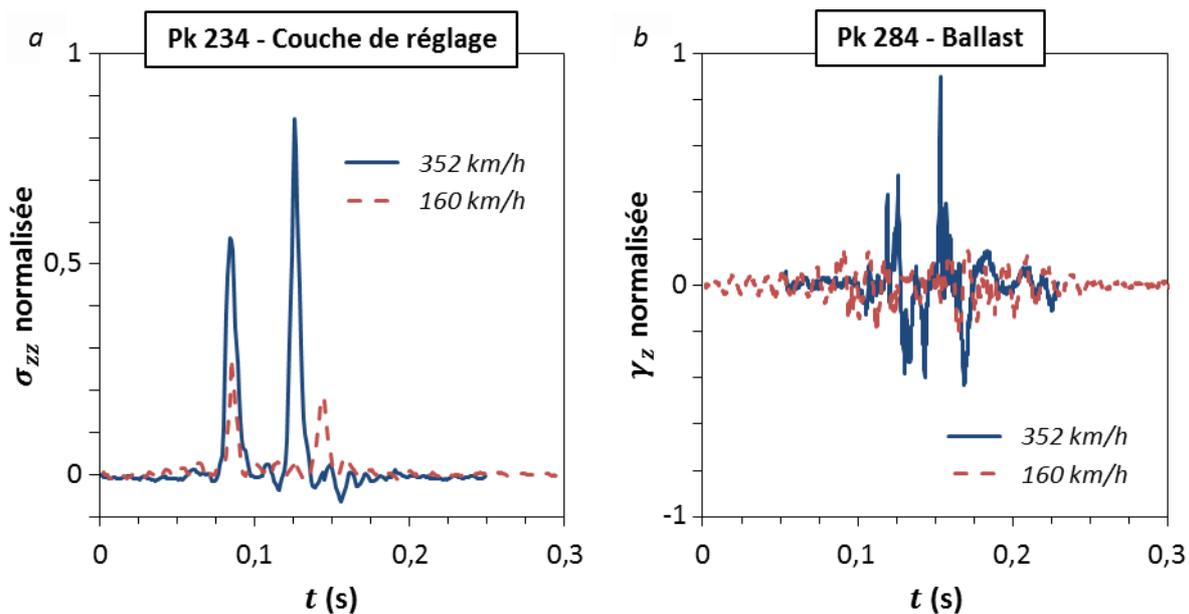


Figure 7. Signaux moyens de bogie porteur calculés sur la base des passages du TGV d'essai à 352 ou 160 km/h : (a) contrainte verticale normalisée dans la sous-couche au pk 234, (b) accélération verticale normalisée dans la couche de ballast au pk 284.

A l'instar de la Figure 6, si le passage des essieux du bogie est facilement identifiable en observant les contraintes verticales dans la sous-couche (Figure 7a), cette identification est plus difficile en observant les accélérations verticales dans le ballast (Figure 7b) ; dont le signal de mesure est davantage perturbé (notamment à faible vitesse). En revanche, on constate bien à l'aide de ces deux graphiques l'augmentation des niveaux de contraintes et d'accélérations verticales (à leurs niveaux respectifs) avec la vitesse de circulation.

En particulier, l'augmentation des accélérations verticales dans le ballast, observée sur la Figure 7b, semble bien quasi-proportionnelle au carré de la vitesse tel que cela est suggéré sur la base de calculs numériques dans [3,5]. En effet, le rapport des niveaux maximaux d'accélérations mesurés à 352 et 160 km/h ($\sim 0,9/0,17 \approx 5,3$) correspond, aux effets d'inertie près, à celui du carré des vitesses ($352^2/160^2 = 4,84$).

6 Conclusion

Dans le cadre du projet d'instrumentation Smartvia® Track SEA, visant à étudier le comportement dynamique des voies ferroviaires, un total de 158 capteurs a été installé sur deux sections du tronçon Angoulême-Bordeaux de la nouvelle LGV SEA : la première avec sous-couche classique en GNT et la seconde avec GB. Le dispositif permet de recueillir de manière automatisée les données de mesures au passage des différentes circulations ferroviaires et de les transmettre en temps réel sur un serveur sécurisé et accessible en ligne.

Les premières mesures sont très encourageantes et semblent déjà apporter des éléments de réponse vis-à-vis de l'influence de la vitesse sur le comportement dynamique des voies. L'analyse des résultats de mesures va se poursuivre au cours de l'année 2017 afin de répondre aux objectifs fixés. La collecte des données va quant à elle se poursuivre jusqu'à la mise en service de la ligne, prévue en juillet 2017, ainsi que sur la première année d'exploitation de la ligne.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier toutes les personnes ayant contribué au bon déroulement du projet Smartvia® Track SEA ; en particulier les équipes d'ETF (filiale de travaux ferroviaires d'Eurovia) et de SEA (COSEA/LISEA/MESEA) pour leur implication et leur professionnalisme.

Références

- [1] A. Robinet. L'expérience grave-bitume sur la LGV Est-Européenne. Symposium international en Géotechnique Ferroviaire, GEORAIL, pp. 477-484, Paris, France, 2011.
- [2] I. Ben Fredj, J. Bernard, B. Héritier, J.-C. Vaniscote, A. Triche, S. Pouget. La sous-couche ferroviaire en grave-bitume (GB) : conception et évolution. Revue Générale des Routes et de l'Aménagement, RGRA n° 923, 2014.
- [3] A. Martin. Analyse numérique de la réponse dynamique des structures ferroviaires : application à la réduction des désordres géométriques induits dans les couches de ballast des Lignes à Grande Vitesse. Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 2014.
- [4] A. Martin, O. Chupin, J.-M. Piau, P.-Y. Hicher. Reducing vertical acceleration in ballast layers of railways to mitigate geometrical disorders in high-speed lines. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2017. DOI: 10.1002/nag.2675
- [5] A. Martin, O. Chupin, J.-M. Piau, P.-Y. Hicher. Dimensionnement des LGV : impact des accélérations sur les couches de ballast. Revue Générale des Routes et de l'Aménagement, RGRA n° 944, 2017.
- [6] B. Pouteau, K. Berrada, I. Drouadaine. Smartvia concept: a 5 years feedback on standalone pavement structure monitoring. 6th Euroasphalt & Eurobitume Congress, Prague, Czech Republic, 2016. DOI: dx.doi.org/10.14311/EE.2016.202
- [7] B. Pouteau, M. Maze. Smartvia® : la route intelligente. Revue Générale des Routes et de l'Aménagement, RGRA n° 901, 2012.
- [8] C. Mauduit, P. Nguyen, V. Mauduit, N. Venries, J.-P. Kerzreho, B. Pouteau, F. Hammoum. Site instrumenté sur l'autoroute A75 : impact des conditions climatiques sur les infrastructures routières. Revue Générale des Routes et de l'Aménagement, RGRA n°907-908, 2012-2013.