



FONDATION D'ENTREPRISE

FEREC

Monitoring Intelligent d'Infrastructures sous Exploitation - LGV Bretagne-Pays de Loire (MINE BPL)

Fondation d'entreprise FEREC

Appel à projets 2019 : Résilience et acceptation : quels outils pour les infrastructures ?



KHAIRALLAH Diana, BLANC Juliette, HORNYCH Pierre, CHUPIN Olivier, PIAU
Jean-michel

UNIVERSITÉ GUSTAVE EIFFEL /MAST-LAMES

RAMIREZ Diego, POUGET Simon – EIFFAGE INFRASTRUCTURES

TA Quang Anh – SNCF RESEAU

DUVAL Anthony – RAILENUM

Frédéric SAVIN - SÉTEC

MINE BPL

I.1 Introduction

Description de la LGV BPL

La ligne à grande vitesse (LGV) Bretagne – Pays de la Loire s’inscrit dans le prolongement de la LGV Atlantique Paris – Le Mans. La ligne traverse deux régions (Bretagne et Pays de la Loire) et trois départements (Sarthe, Mayenne et Ille-et-Vilaine) et s’étend sur 182 km entre Connerré (Sarthe) et Rennes (Ille-et-Vilaine). 105 km de voie ont été construits avec de la grave-bitume de performances plus élevée, de classe 4 (GB4) au sens de la norme NF EN 13-108-1 (Ben Fredj et al., 2014; Dos Santos, Prinnet, Fillon, Cervantes, José, & Triche, 2014) (GB4) implantée sous le ballast alors que 77 km de voie classique ont été construits avec une sous couche en matériaux granulaires de type grave non traitée (GNT).

Tableau 1 - Structures de la LGV BPL

Structure granulaire	Structure bitumineuse
Couche de ballast, épaisseur 30 cm	Couche de ballast, ep. 30 cm ----- Couche sous-ballast en GB4, ep. 12 cm
Couche en GNT, ep. 20 cm	Couche en GNT, ep. 15 cm
Couche de forme traitée, ep. 35 cm	Couche de forme traitée, ep. 35 cm
Sol support	Sol support

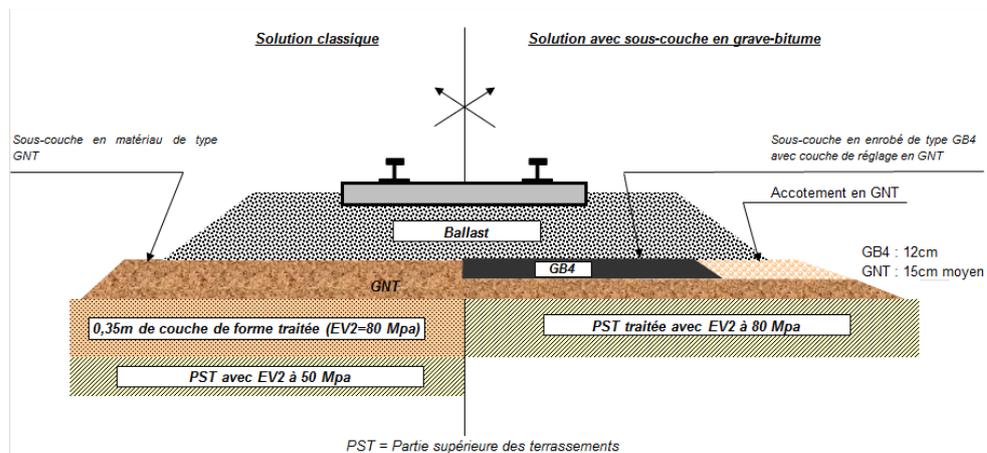


Figure 1 - Les deux structures de la LGV BPL

Les différentes structures, classique avec sous-couche en matériaux granulaires et bitumineuse avec sous couche en GB, de la ligne à grande vitesse sont présentées dans le Tableau 1 et illustrées dans la Figure 1. La voie classique comprend une couche de ballast d'une épaisseur de 30 cm sous traverse reposant sur une sous-couche en GNT. Le matériau granulaire repose sur une couche de forme traitée de 35 cm sur la partie supérieure des terrassements (PST). Sur la structure bitumineuse, la PST est surmontée d'une couche de réglage de 15 cm en (GNT) sur laquelle est placée la sous-couche en GB, d'une épaisseur de 12 cm.

La partie supérieure des terrassements (PST) est traitée à la chaux et au liant hydraulique et présente une portance minimale de 80 MPa telle que définie dans le dimensionnement mécanique de la structure.

Description des sections instrumentées

Afin de comprendre et comparer le comportement mécanique des sections avec et sans grave bitume, quatre sections de la ligne ont été choisies et instrumentées avec d'importants dispositifs de mesures : 3 sur la structure avec GB (2 sur le Toarc G et 1 sur le Toarc F), et une sur la structure classique granulaire (section de référence Toarc A) comme le montre la Figure 2.

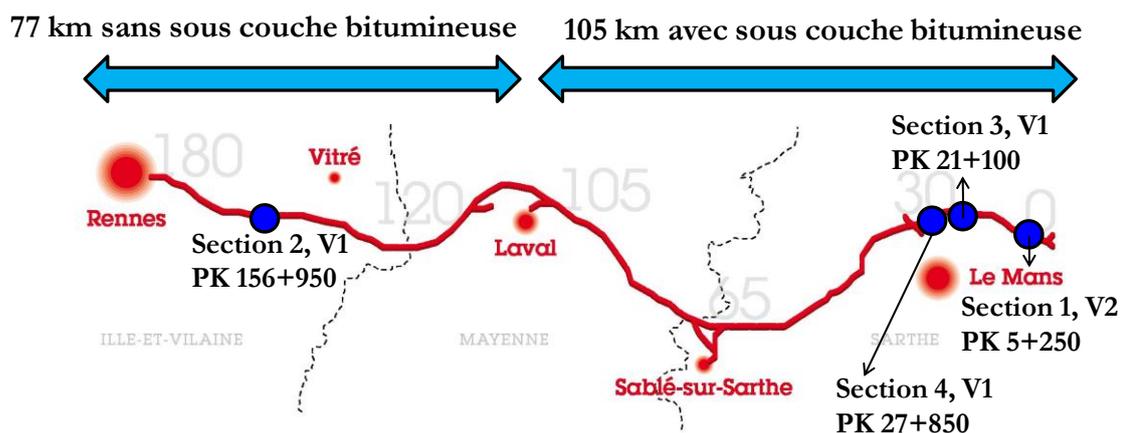


Figure 2 - Sections instrumentées sur la LGV BPL

- Section 1 (PK 5+250) : section droite rectiligne avec GB sur la voie 2 de Paris à Rennes. Le sol est composé de sable fin jaunâtre avec des strates grisâtres et verdâtres avec une venue d'eau détectée à une profondeur de 4.5 m lors d'un sondage réalisé jusqu'à 6.5 m.
- Section 2 (PK 156+950) : section droite rectiligne sans GB sur la voie 1 de Rennes à Paris. Le sol est composé d'argile schisteuse sans arrivée d'eau signalée sur la section.
- Section 3 (PK 21+100) : section avec GB en courbe, sur la voie 1 allant de Rennes à Paris.
- Section 4 (PK 27+850) : section droite rectiligne sur la voie 1, avec sous couche en GB. Similairement à la section 2, le sol est argileux jaunâtre avec des passées sableuses et des blocs épars, sans présence d'eau sur ce site.

Des capteurs de déflexion ancrés, des accéléromètres, des extensomètres de déformation verticale et horizontale, des sondes d'humidité, des sondes de températures et des stations météo ont été mis en

place pour l'instrumentation de la ligne à grande vitesse. Leur répartition sur les quatre sections, leur implantation et leur positionnement dans les différentes couches des structures ont été définis par l'IFSTTAR. La nature des capteurs ainsi que leur mise en œuvre sont exposées en annexe.

A noter qu'aucune instrumentation n'a été prévue dans la couche de ballast (matériau discontinu), car cette couche est soumise régulièrement à des opérations de bourrage, ce qui rend la survie de capteurs très aléatoire.

Acquisition des données

Le système d'acquisition utilisant les cartes Pégase (V Le Cam, Lemarchand, Martin, & Bonnac, 2010; Vincent Le Cam, Cottineau, Lemarchand, & Bourquin, 2008) a été choisi pour l'acquisition des mesures des capteurs sur la LGV BPL. 2 types de mesures sont réalisées sur chaque section : des mesures continues et des mesures rapides instantanées. Les mesures continues incluent la température, la teneur en eau, l'enregistrement des données météo et les mesures des capteurs de déplacement ancrés, dont la fréquence d'échantillonnage est de 15 minutes. Quant aux mesures rapides, il s'agit des mesures des jauges, des accéléromètres, des capteurs de déflexion se déclenchant sur seuil réglable d'un capteur au passage des TGV sur la voie avec mémorisation du signal. Ce type d'acquisition comprend :

- o Un pré trigger réglable, imposé à 2 secondes et une durée de signal de 10 secondes
- o Une fréquence d'échantillonnage de 2000 Hz
- o Un temps de stockage réglable de 2 à 20s.

L'ensemble des données collectées sur chaque section sont transmises via réseau 3G/4G, dans un délai de quelques heures maximum, sur un serveur distant hébergé par la société Power-Lan, fournisseur de la partie serveur de données distant. Ces données peuvent être téléchargées à partir d'une application Web, avec laquelle les signaux de mesure peuvent également être visualisés. Pour chaque carte d'acquisition, l'application permet la visualisation en temps réel des mesures lentes et rapides associées à chaque capteur.

Les plateformes d'acquisition et de visualisation des données sont détaillées en annexe.

I.2 Contexte de MINE BPL

La première phase d'acquisition de données était la phase de montée en vitesse qui a duré de Novembre 2016 jusqu'à Janvier 2017, avant l'ouverture de la ligne au trafic commercial. Un train unique, de charge connue, a circulé dans les deux sens sur les quatre sections la voie avec des vitesses variant de 160 à 352 km.h⁻¹. Ceci a permis de réaliser des comparaisons des réponses mécaniques des structures en fonction de la vitesse de circulation des trains sur une même section.

Quant à la phase d'exploitation commerciale débutante le 1er juillet 2017, le suivi des données durant les travaux de thèse a duré près de 2 ans jusqu'en mai 2019. Le trafic durant cette période était en moyenne de 23 TGV par jour, et divisé en 4 types de TGV, simples à 13 et 15 bogies, et doubles à 26 et 30 bogies. Par conséquent, l'analyse à ce stade avait requis un grand nombre de fichiers de mesure. Ces données n'ont été que partiellement traitées afin d'évaluer la déflexion maximale et les accélérations maximales et minimales pendant la période d'observation, en fonction du type de train.

I.3 Travail précédent

I.3.1 Traitement des données lors de la phase de montée en vitesse

I.3.1.1 Calcul de la vitesse des trains

Deux capteurs de déflexion ancrés, séparés de 6 m, sont installés sur les sections 1 et 4. Sur la section 2, les deux capteurs sont distants de 7 m. Les mesures de ces capteurs étant déclenchées lors du passage du train, l'intervalle de temps entre les pics de signal du premier capteur et du second capteur est calculé. Par la suite, la vitesse est calculée en divisant la distance entre les deux capteurs par l'intervalle de temps ($V = \frac{d}{\Delta t}$) (Erreur ! Source du renvoi introuvable. Figure 3).

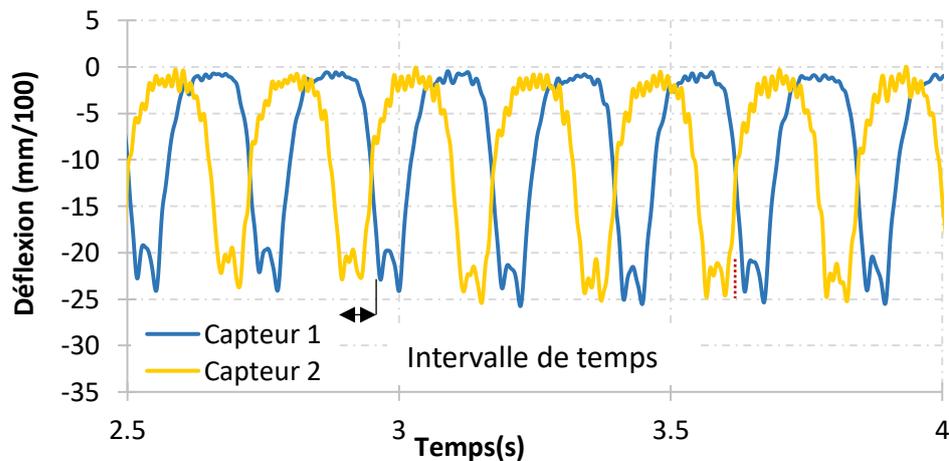


Figure 3 - Signaux filtrés de deux capteurs de déplacement ancrés - Vitesse du train 160 km.h⁻¹

I.3.1.2 Filtrage des mesures

Le programme filtre les mesures avec un filtre passe-bas (filtre de Butterworth) ajusté en fonction de la vitesse du train calculée, pour éliminer les effets dynamiques observés aux hautes fréquences. Ainsi, les effets hautes fréquences liés à la dynamique des masses non suspendues, en particulier aux défauts de roue, sont séparés des effets d'interaction à plus basses fréquences entre véhicules et infrastructure. Il s'agit d'un mode de séparation entre les accélérations d'ordre structurelle (γ_z basses fréquences), des accélérations aléatoires générées par le matériel roulant (γ_z hautes fréquences).

La fréquence de coupure f_c est calculée en fonction de la longueur d'onde « roue » de l'ordre de 3 m et de la vitesse de circulation. En l'occurrence, on appelle fréquence « roue » la fréquence à laquelle un même point de la roue (et donc éventuellement un même défaut) se retrouve en contact du rail, $f_c = V/2\pi R$. La fréquence f_c calculée est majorée de 10% pour éviter une perte significative du signal recherché. V est la vitesse du train (en m/s) et R le rayon de la roue en mètre.

Un exemple de signal filtré et non filtré est présenté Figure 4 pour la déflexion et Figure 5 pour l'accélération verticale.

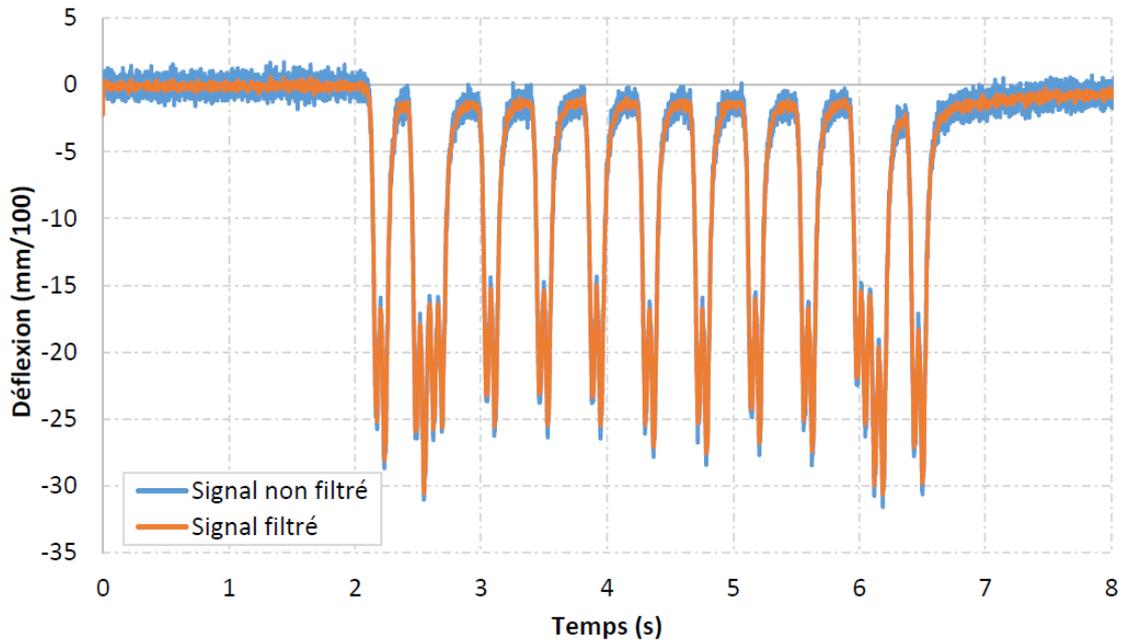


Figure 4 - Signal filtré et non filtré de déflexion pour un passage de train le 25 novembre 2016 à $V=160$ km/h sur la section granulaire

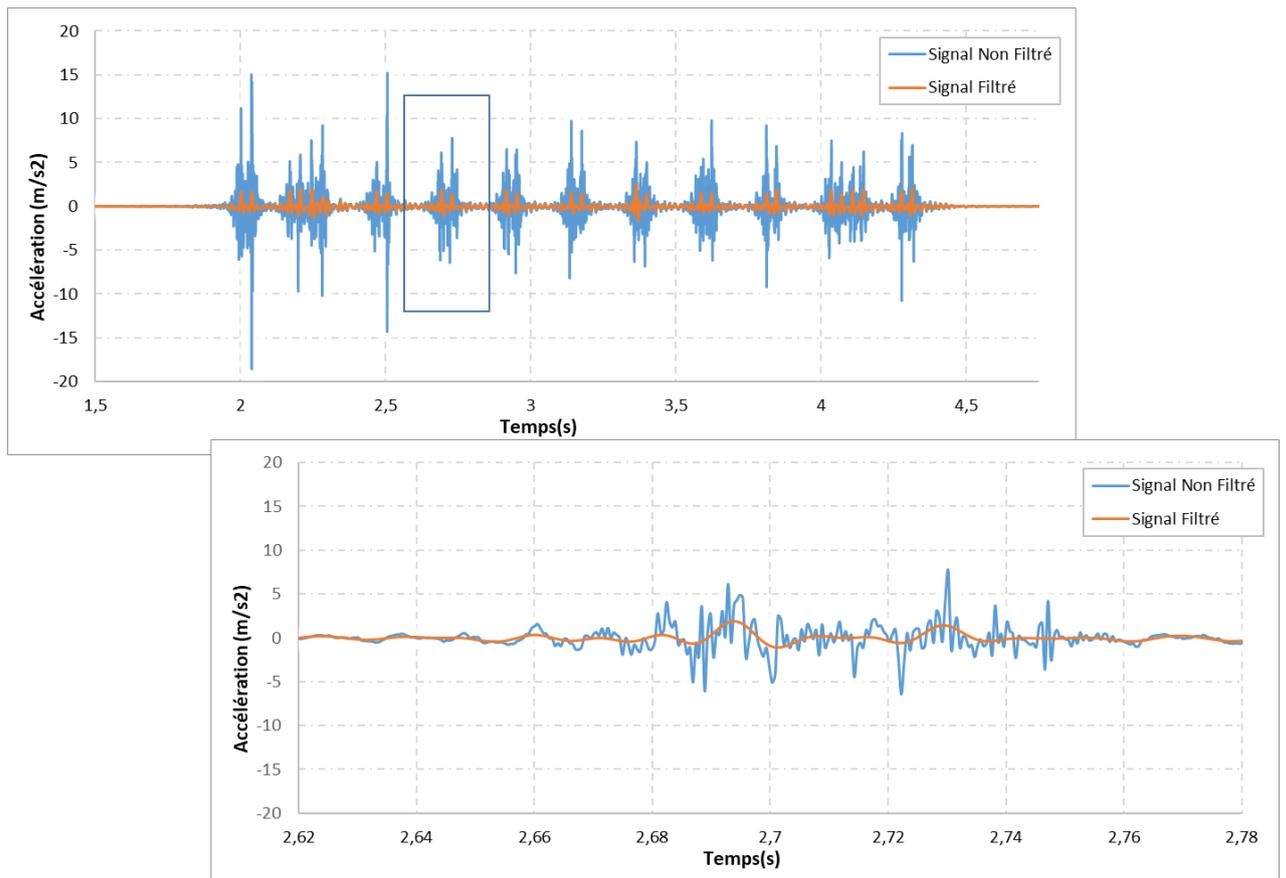


Figure 5 - Un signal filtré et non filtré d'accélération verticale pour un passage de train le 25 novembre 2016 à $V=160$ km/h sur la section granulaire, $f_c = V/l=44/3$ Hz

Le filtrage n'affecte quasiment pas les signaux des capteurs ancrés de déflexion comme montré sur la Figure 4 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, ce qui confirme le « caractère de réponse

structurelle » du signal filtré. Par contre, ce traitement réduit sensiblement les intensités des pics d'accélération et les ramène à des niveaux quasiment égaux pour les bogies de poids quasi-identiques (Figure 5 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

I.3.1.3 Méthode de « cumul des bogies porteurs »

Les mesures des signaux sont traitées par la méthode dite de "cumul des bogies porteurs". Cette méthode de traitement permet d'analyser l'influence de différents paramètres tels que la vitesse de circulation des trains sur les accélérations verticales.

Pour un capteur donné et au passage d'un TGV à une vitesse connue, la méthode consiste à retracer, à partir d'une même origine de temps, les signaux des passages de bogies porteurs à charges très voisines tout en omettant les bogies moteurs des locomotives à charges différentes par séquençage et par translation temporelle du signal complet.

Les signaux de mesures filtrés des 7 essieux porteurs du train se superposent ainsi. Pour un capteur donné, on calcule ensuite la courbe moyenne obtenue pour l'ensemble des essieux et les courbes situées à plus ou moins un écart type permettant d'évaluer la dispersion des mesures.

Pour chaque signal d'accéléromètre, de capteur ancré de déflexion et de jauge verticale filtré, la méthode de « cumul des bogies porteurs » est appliquée aux bogies porteurs.

Après isolation des séquences liées au passage des sept bogies porteurs, les parties du signal en dessous de $-10 \text{ mm}/100$ sont supprimées dans le but de retrouver les pics du signal correspondant à chaque bogie (c'est-à-dire tous les points se situant en dessous de la ligne bleue de la Figure 6). Ainsi, l'intervalle de temps pour chaque signal de bogie est calculé à partir du nombre de points éliminés pour chaque pic. La bande relative à chaque pic est enfin élargie de 50% afin de ne pas rater des parties du signal de bogie.

La charge à l'essieu des bogies moteur est de 17 t/essieu tandis que la charge à l'essieu des bogies porteurs intermédiaires varie entre 14.5 t et 15.5 t par essieu. Après constatation que la différence entre les résultats pondérés et non pondérés était négligeable, l'étape de normalisation n'a pas été appliquée.

Les signaux sont ensuite tracés (comme dans la Figure 7) en fonction de la distance obtenue du produit entre la vitesse du train et le temps (Vt en abscisse), désignant la distance entre la roue et le capteur considéré. Le "signal moyen" du capteur considéré est calculé point par point. La dispersion des signaux des différents bogies est très faible.

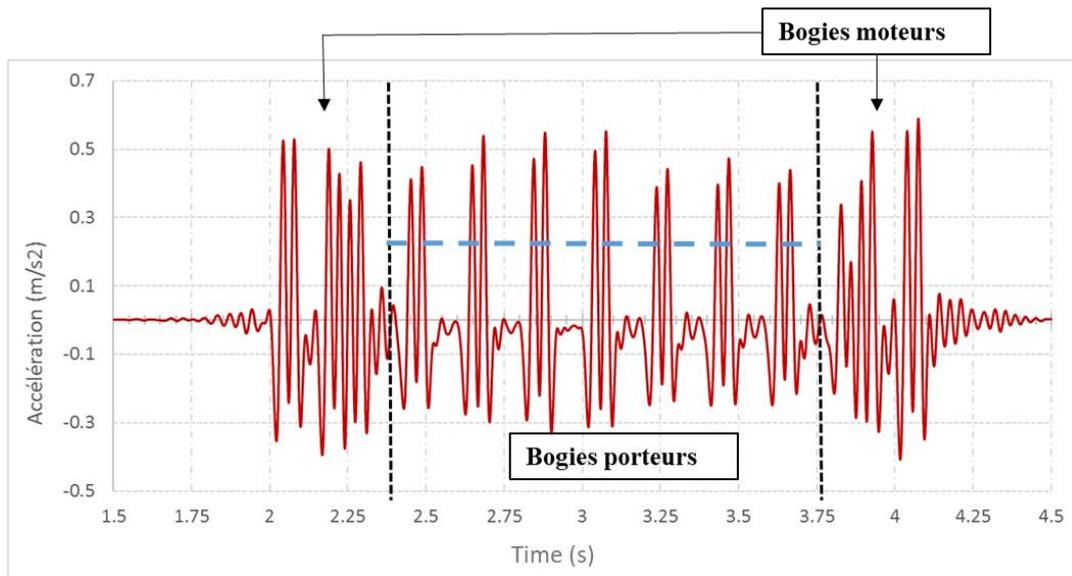


Figure 6 - Signal de déflexion verticale filtré pour un passage de train - Vitesse du train 320 km.h⁻¹ (Thèse khairallah)

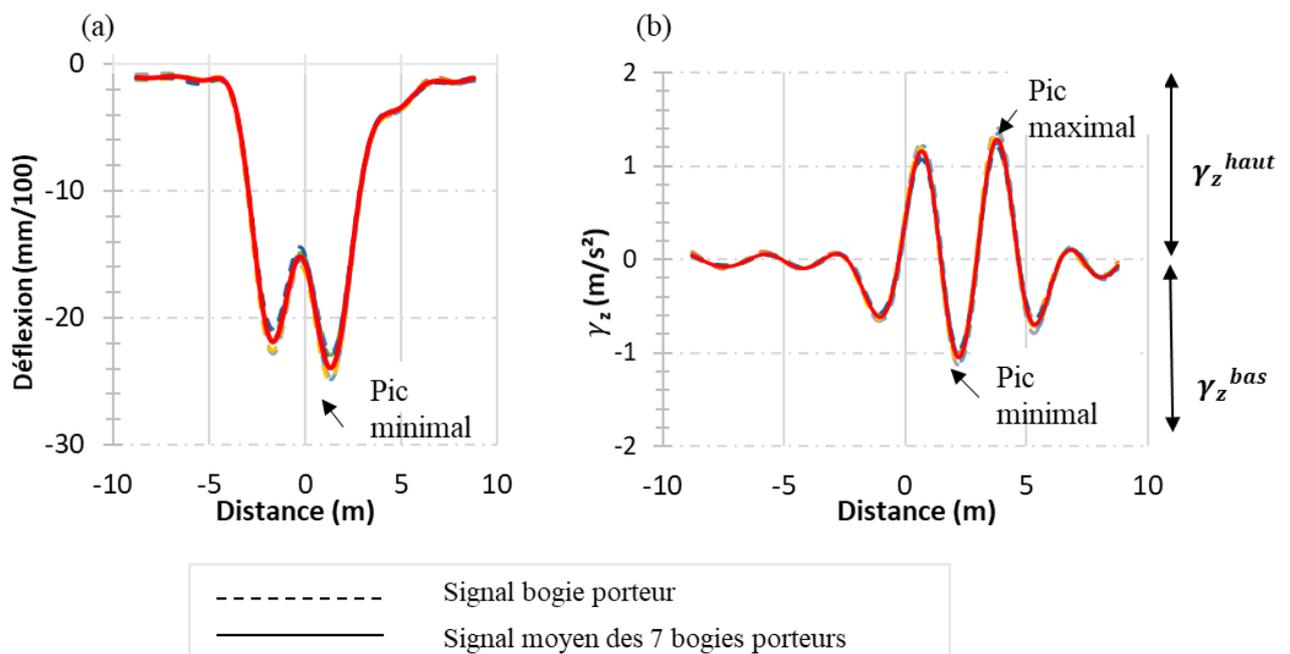


Figure 7 - (a) Signaux de déflexion des sept bogies porteurs superposés et leur signal moyen (b) signaux d'accélération des sept bogies porteurs superposés et leur signal moyen

I.3.2 Résultats clés de la phase de montée en vitesse

La fiabilité des mesures a été prouvée en évaluant la répétabilité des mesures des capteurs durant la phase de montée en vitesse de 3 mois. Les mesures enregistrées ont montré que les niveaux d'accélérations sous le ballast, induits par le passage des trains, augmentent lorsque la vitesse augmente pour les deux types de structure, granulaire et bitumineuse. A titre d'exemple sur la section granulaire, la Figure 8 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** montre les profils des capteurs à la base de la GNT AF1, AF2 et AF3 en traits pointillés et les profils des capteurs au sommet de la GNT AS2, AS4 et AS6 en traits continus. Les accélérations sont clairement plus élevées au sommet de la couche granulaire qu'à la base.

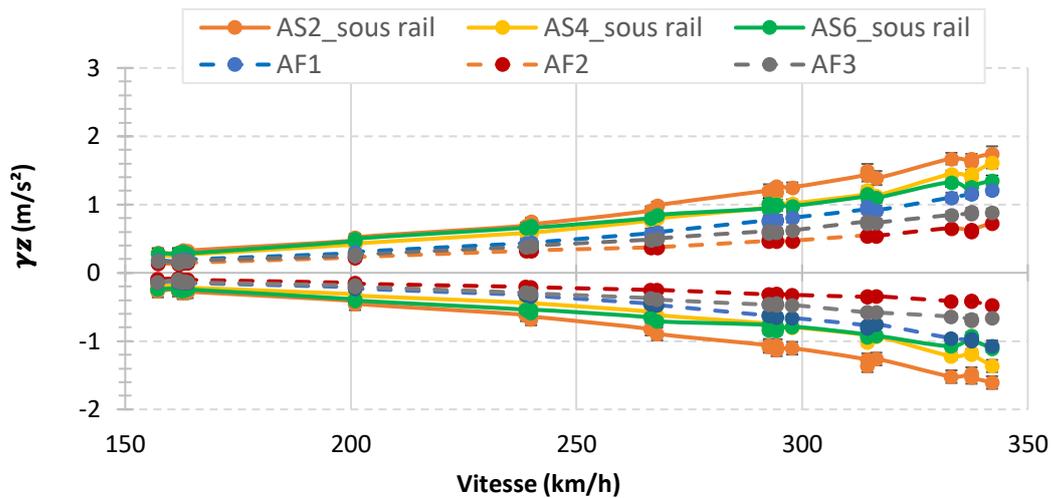


Figure 8 - Comparaison entre les accélérations verticales maximales positives et négatives en fonction de la vitesse, des accéléromètres au sommet de la sous-couche granulaire installés sous l'axe du rail et ceux à la base, pour les passages de train dans le sens 1 sur la section 2 pendant la phase de montée en vitesse

Les valeurs des déformations verticales dans la couche granulaire ne dépassent pas $30\mu\text{def}$ sur toutes les sections. Prenons l'exemple de la section granulaire. La Figure 9 compare les réponses des jauges verticales installées sous le rail interne (J1), sous le rail externe (J2, J4 et J5) et à 70 cm du rail externe (J3 et J6) maximale en fonction de la vitesse du train. Quel que soit le capteur et la vitesse, la déformation verticale maximale enregistrée sur la section avec sous-couche granulaire ne dépasse pas $20\mu\text{def}$, une valeur très faible.

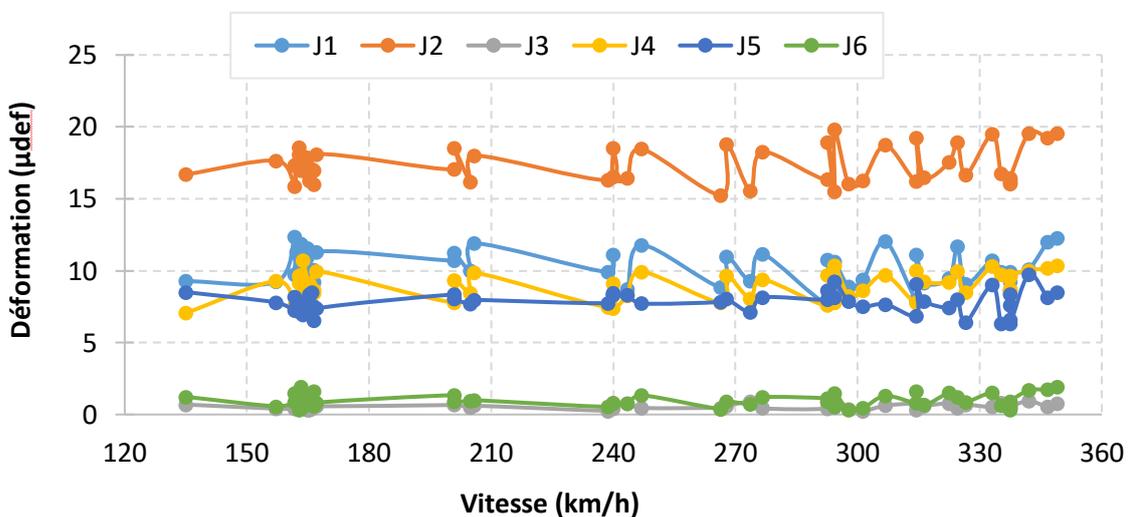


Figure 9 - Déformations verticales maximales en fonction de la vitesse, des jauges verticales placés dans la sous-couche granulaire, pour les passages de train sur la section 2 pendant la phase de montée en vitesse

Les déformations horizontales à la base de la couche de GB, dans les sections bitumineuses, sont trouvées toujours inférieures à $15\mu\text{def}$. Vu que les valeurs sont largement inférieures aux niveaux de déformation conduisant à l'endommagement en fatigue des matériaux bitumineux, il a été conclu que la sous-couche en GB ne travaille pas en fatigue.

La Figure 10 présente les pics d'accélération minimales et maximales, déterminées à partir du signal moyen, pour les accéléromètres installés sous le rail extérieur et permet de comparer le comportement des structures construites avec une sous-couche de GB et de GNT.

L'étude de la phase de test a démontré que la présence d'une sous-couche en GB dans la structure ferroviaire réduit les amplitudes d'accélération sous le ballast, est bénéfique pour la stabilité de la couche de ballast et limite sa détérioration (Figure 10). Le rôle d'amortissement de la couche de GB est mis en évidence sur les courbes de déflexion.

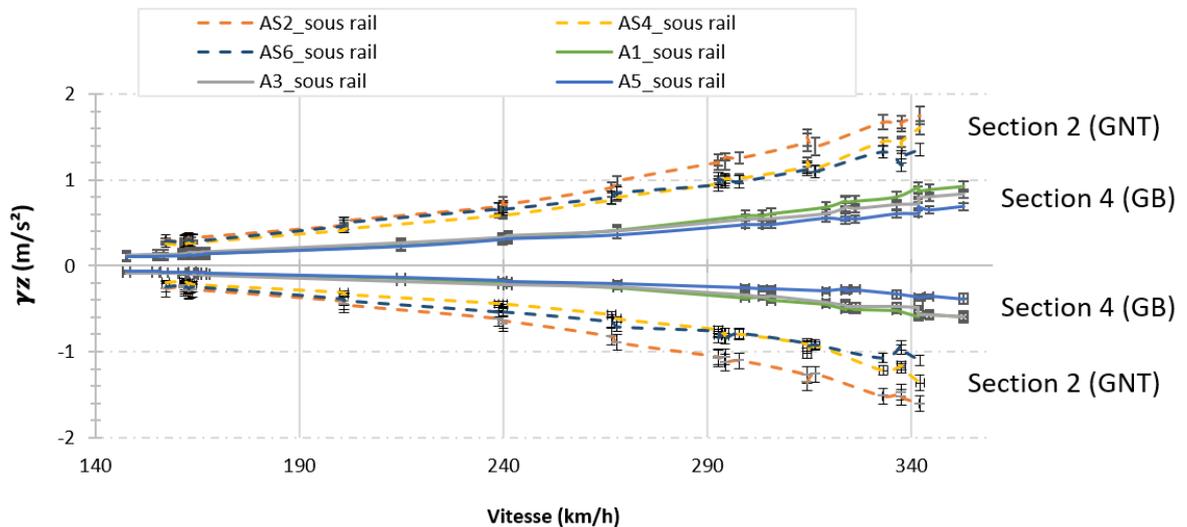


Figure 10 - Comparaison des valeurs maximales d'accélération verticales positives et négatives, des passages de train en fonction de la vitesse sur les sections 2 (traits en pointillés) et 4 (traits continus) pendant la phase de montée en vitesse pour les accéléromètres entre les deux rails

I.3.3 Traitement des données lors de la phase commerciale

Un traitement et une première analyse partielle des données ont été réalisés sur la base de mesures effectuées sous trafic réel, entre Juillet 2017 et Mai 2019. Cette analyse a porté principalement sur l'analyse des mesures des accéléromètres placés au sommet des sous-couches et des capteurs ancrés de déflexion.

I.3.3.1 Calcul de la vitesse des trains

Pour calculer la vitesse du TGV passé à une date donnée, on part du signal d'accélération verticale enregistré pour ce passage. Etant donné que les essieux des TGV sont espacés de 3 m, le calcul de la vitesse du TGV se fait à partir de l'intervalle de temps séparant les pics correspondant à deux essieux successifs du signal d'accélération verticale sélectionné. La vitesse du TGV est le rapport de la distance qui sépare les deux essieux et l'intervalle de temps correspondant ($V = \frac{3\text{ m}}{\Delta t}$).

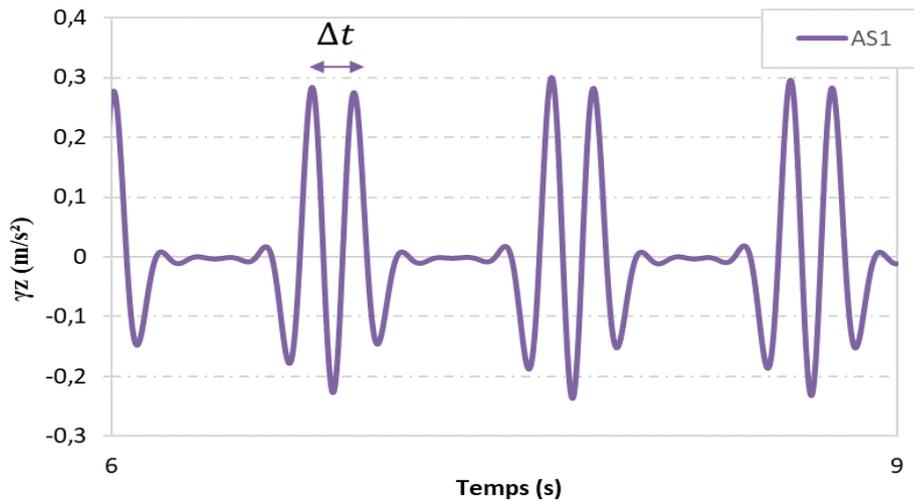


Figure 11 – Signal d'accélération enregistré sur la section 2 granulaire

I.3.3.2 Filtrage des mesures

Le filtrage appliqué pour les mesures de signaux expérimentaux de la phase commerciale est le même filtre passe-bas appliqué pour la phase test (Paragraphe I.3.1.2).

I.3.3.3 Type du trafic commercial

Quatre types de TGV circulent sur les sections de la LGV BPL. La Figure 12 illustre les profils temporels de déflexion des passages des trains simples ayant respectivement 13 bogies (a) et 15 bogies (b), sur la section 4 à $V=280\text{ km.h}^{-1}$, le 1^{er} juillet 2017. La Figure 13 présente les profils de déflexion enregistrées pour deux passages de trains doubles, à 26 bogies (a) et à 30 bogies (b), ayant traversé la section 4, ce même jour. Le type de train est identifié en comptant les pics d'un signal d'accélération relatif au passage du TGV sur la section.

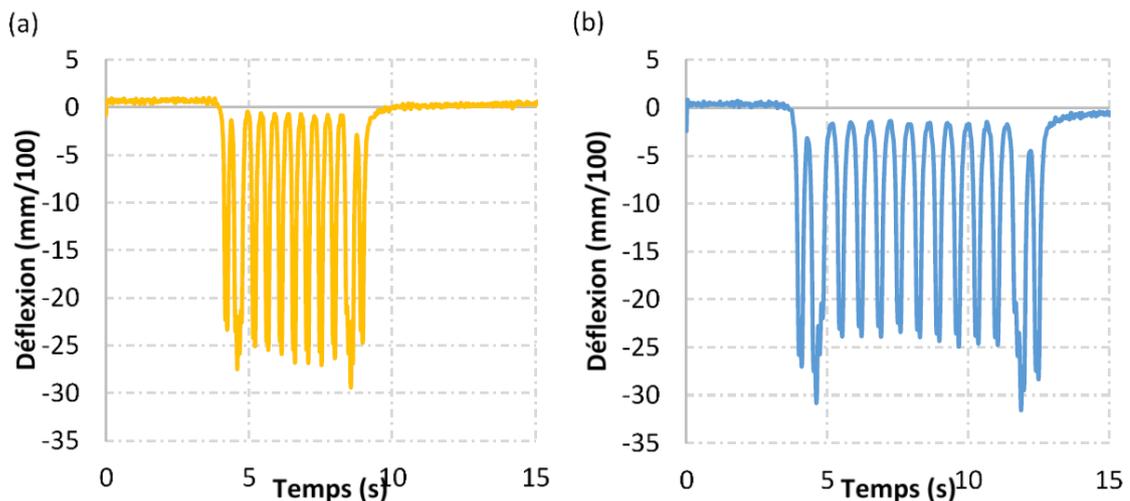


Figure 12 - Profils temporels de déflexion d'un train simple à 13 bogies (a) et à 15 bogies (b), ayant circulés sur la section 4 en juillet 2017

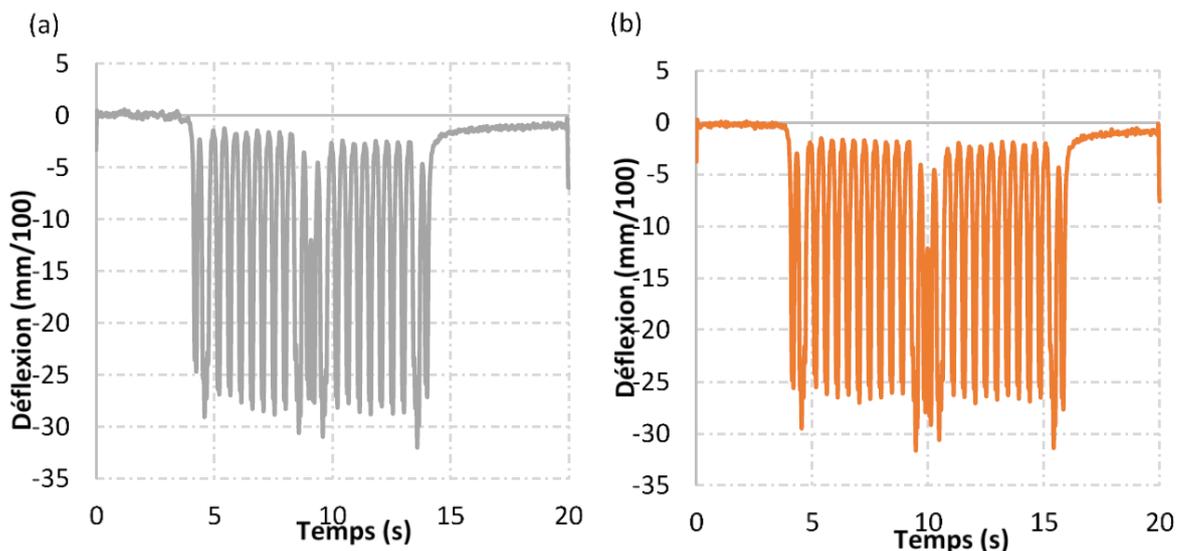


Figure 13 - Profils temporels de déflexion d'un train double à 26 bogies (a) et à 30 bogies (b), ayant circulés sur la section 4 en juillet 2017

I.3.4 Résultats de la phase commerciale

La phase d'exploitation commerciale sur la LGV BPL a débuté le 1er juillet 2017 suite à l'inauguration de la voie. Depuis, le trafic circule sur les différentes sections instrumentées de la voie et est composé de 4 types de TGV, simples à 13 et 15 bogies, et doubles à 26 et 30 bogies. Cette phase d'acquisition a généré un grand nombre de fichiers de mesure. Le traitement et l'analyse de ces données a débuté partiellement avec les travaux de thèse (Khairallah, 2019) pour une période d'observation de 23 mois. Elle a porté principalement sur la procédure d'identification des types de trains ayant circulé sur la voie et sur l'analyse des mesures de déflexion des sections 1, 2 et 4 et les mesures des accélérations verticales au sommet de la sous-couche sur les sections 2 et 4.

L'analyse des déflexions a montré des niveaux de déflexion comparables à ceux obtenus pendant la phase de montée en vitesse, et plus élevés sur la section 1 (avec des valeurs de l'ordre de 48 à 70 mm/100) que sur les sections 2 et 4 (avec des valeurs de l'ordre de 25 à 42 mm/100), probablement en raison de différences de portance de la plateforme. Aucune dégradation de la voie n'a été observée sur les 2 ans de suivi (Figure 14).

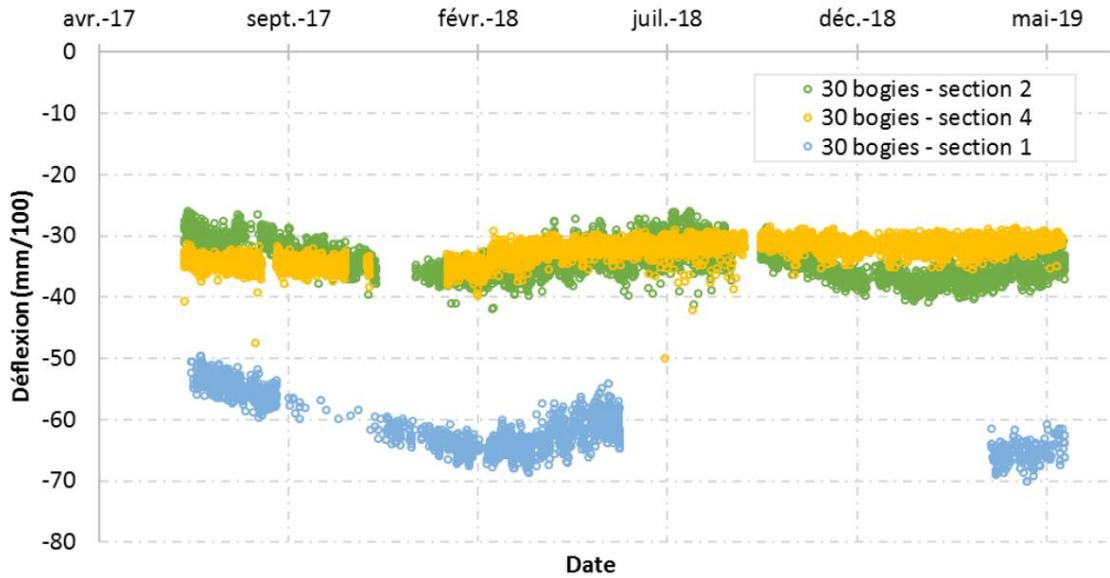


Figure 14 - Comparaison entre les valeurs maximales de déflexion mesurées sur la section 2 avec sous couche granulaire et les sections 4 et 1 avec sous couche bitumineuse

Quant à l'analyse des accélérations, mesurées au niveau du sommet des sous-couches, il n'y avait pas de différence significative entre les niveaux d'accélérations produits par les différents types de trains, ni d'évolution significative des accélérations sur les 23 mois de suivi. En revanche, la diminution d'un facteur 2 environ des accélérations obtenues sur la section avec sous couche bitumineuse est bien confirmée (Figure 15).

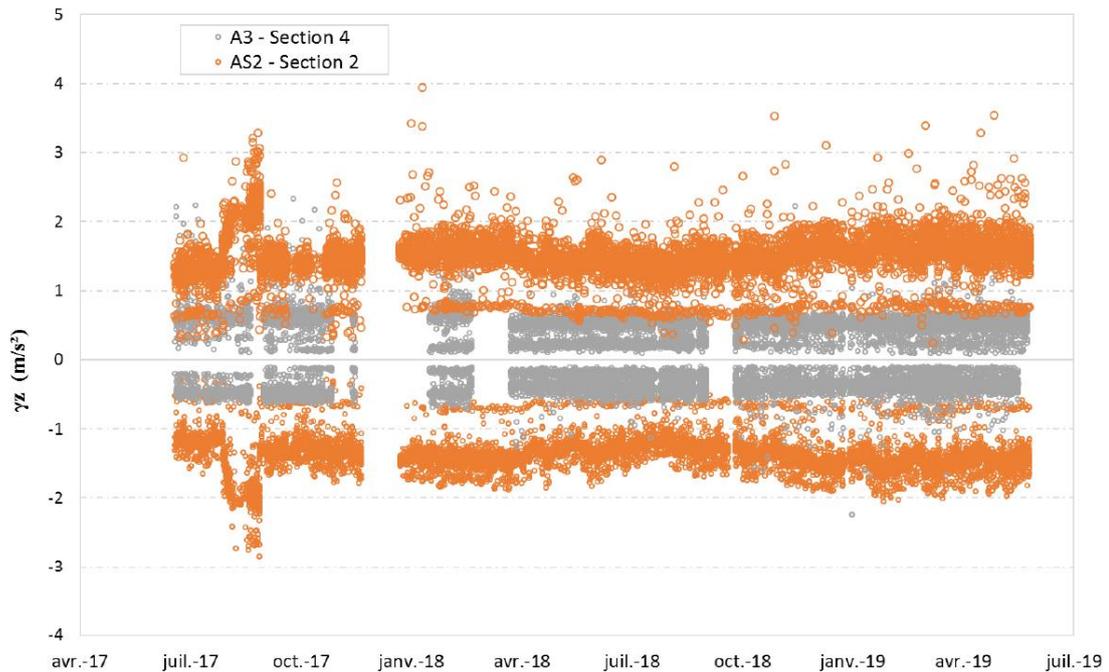


Figure 15 - Comparaison des valeurs maximales des accélérations verticales positives et négatives mesurées par l'accéléromètre AS2 sur la section 2 avec sous couche granulaire et l'accéléromètre A3 sur la section 4 avec sous couche bitumineuse pendant la phase commerciale

I.4 Objectifs principaux de MINE BPL

La période d'observation de 23 mois de trafic commercial n'est pas suffisante pour voir une évolution significative des déflexions ou accélérations, qui pourrait traduire un endommagement de la voie. Le traitement se consacrait précédemment aux valeurs maximales et minimales des signaux. Il était donc très intéressant de poursuivre le suivi de la voie sur une plus longue période afin de juger le traitement des données conforme à ce type de mesures de capteurs. En raison du grand nombre de passages de TGV enregistrés de plusieurs types, avec différents nombres de bogies, il semblait pertinent de mettre au point une procédure de traitement des données applicable sur le long terme. Des procédures de traitement différentes ont été testées pour en choisir une adéquate à la réalisation d'un outil automatique de suivi des mesures dans le temps.

Un allègement du suivi en réduisant l'instrumentation mise en place sur des structures de voie ferroviaire était aussi à proposer. D'où la mise en place du projet « MINE BPL ».

I.5 Mesures instantanées des capteurs

Cette partie est consacrée à l'analyse des mesures enregistrées sur la LGV BPL durant la phase d'exploitation commerciale qui a débuté avec l'inauguration de la voie le 1er juillet 2017. On présente en premier lieu les méthodes de traitement de données développées pour cette phase, pour chaque type de mesures des capteurs sur les sections 1, 2, 3 et 4. Les différentes mesures réalisées sont analysées par section, pour une durée de 3 ans de service de la voie (juillet 2017 à juillet 2020).

I.5.1 Déflexion

Dans cette section, on présente les résultats des mesures de déflexion de la structure située sous le ballast, pour les 3 sections 1, 2 et 4, pendant la phase de circulation commerciale débutant en juillet 2017. Les capteurs de déflexion ancrés, de type LVDT 4-20 mA, sont placés par paire sur les différentes sections.

I.5.1.1 Emplacement des capteurs de déflexion ancrés

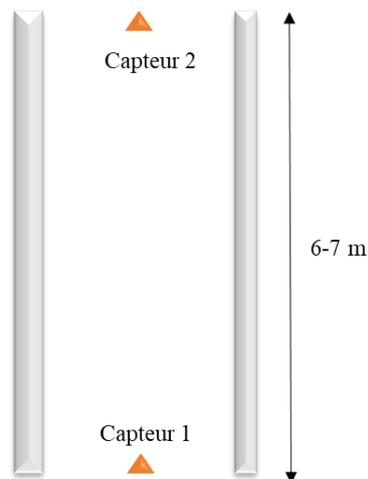


Figure 16 – Schéma d'instrumentation des capteurs de déflexion ancrés

2 capteurs de déflexion ancrés, séparés d'une distance de 6 m sont installés au milieu des rails sur les sections bitumineuses 1 et 4. Sur la section granulaire 2, les 2 capteurs de déflexion ancrés sont séparés d'une distance de 7 m.

A noter qu'aucun capteur de déflexion a été mis sur la section 3 à structure bitumineuse en courbe.

I.5.1.2 Traitement des mesures

Pour les mesures de déflexion, on a choisi de se concentrer sur l'extremum du signal de déflexion de chaque passage, obtenu avec Scilab. En d'autres termes, nous étudions la valeur maximale absolue après calcul de la vitesse du TGV passé à une date donnée lors de la phase de circulation commerciale.

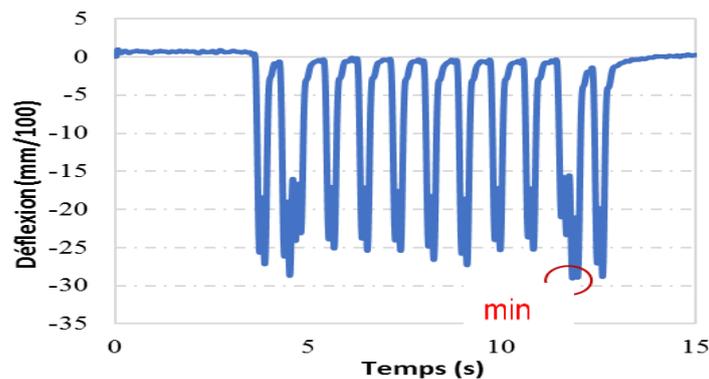


Figure 17 - Extremum du signal de déflexion obtenu avec Scilab

I.5.1.3 Résultats des mesures par section

➤ Section 1 :

Pour la section 1 avec sous couche bitumineuse, les pics de déflexion sont présentés dans la Figure 18 par ordre chronologique des passages des TGV et en fonction du type de train. Le capteur indique une déflexion maximale variant entre 50 et 70 mm/100, sans différence entre trains simples et doubles.

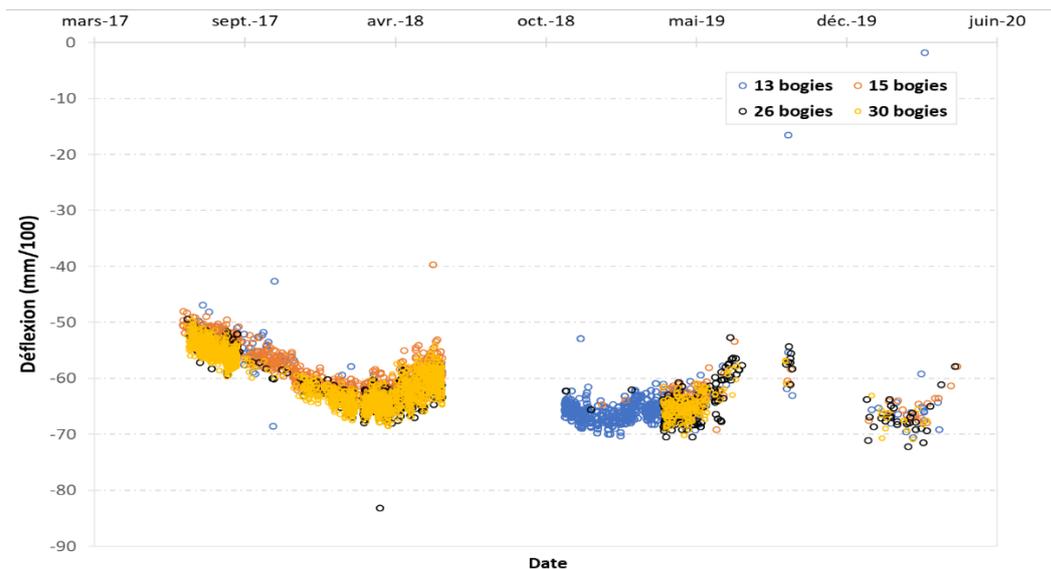


Figure 18 - Déflexions maximales mesurées sur la section 1 avec sous couche bitumineuse, pendant la phase d'exploitation commerciale, par ordre chronologique de passage des trains.

➤ Section 2 :

Sur la section 2 avec sous-couche granulaire, les valeurs maximales retenues pour chaque passage de train sont tracées sur la Figure 19, par ordre chronologique des passages en distinguant les quatre types de trains circulant sur la LGV.

D'après le graphique, nous pouvons constater que les mesures des capteurs indiquent des valeurs maximales de déflexion sur la section granulaire variants entre 25 et 42 mm/100. Ces valeurs présentent des variations saisonnières, avec des valeurs plus élevées en hiver qu'en été, sans différence entre les quatre types de train.

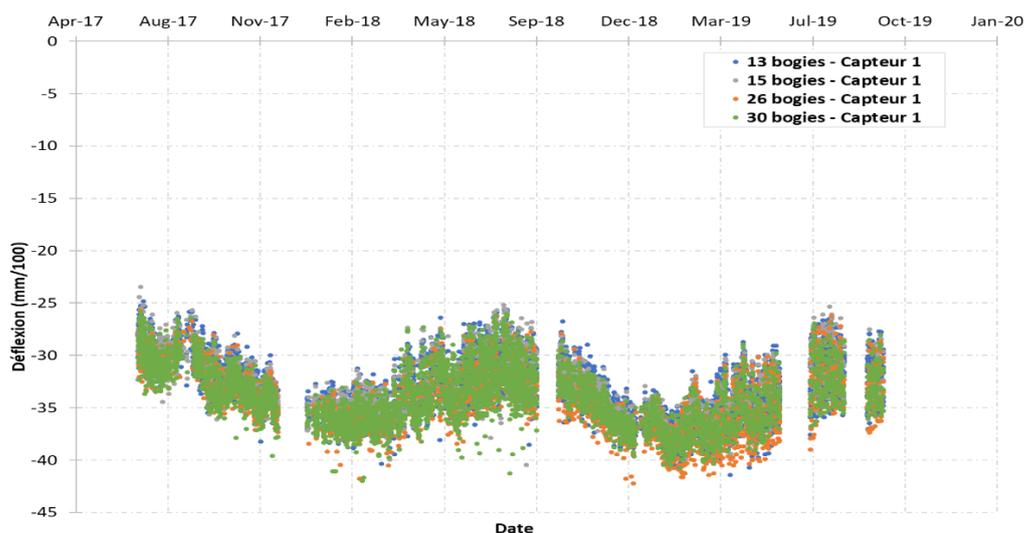


Figure 19 - Déflexions maximales mesurées sur la section granulaire pendant la phase commerciale, par ordre chronologique de passage des trains, sur une durée de 23 mois.

➤ Section 4 :

Les pics de déflexion enregistrés sur cette section bitumineuse sont présentés dans le graphique de la Figure 20 et indiquent des valeurs maximales de 35 $mm/100$ en moyenne. Les valeurs mesurées sur cette section sont proches de celles de la section 2, sans présenter cependant de variations saisonnières. En effet, les déflexions diminuent légèrement au début de la phase d'exploitation commerciale, mais semblent se stabiliser par la suite.

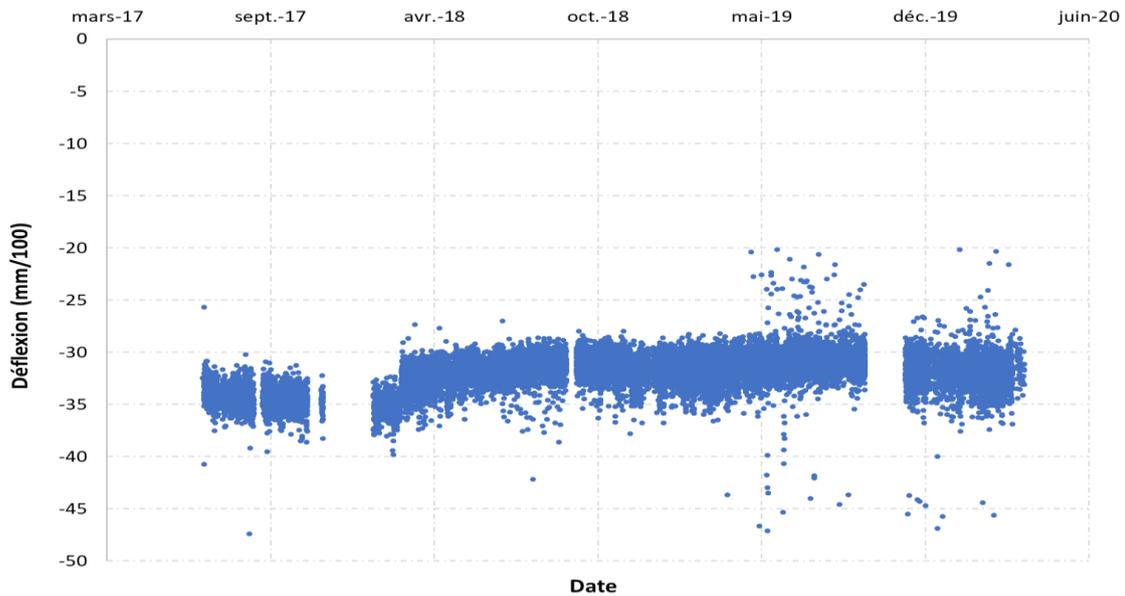


Figure 20 - Déflexions maximales mesurées sur la section 4 bitumineuse, pendant la phase d'exploitation commerciale, par ordre chronologique de passage de tout type de train, sur une durée de 23 mois

I.5.1.4 Comparaisons des mesures entre sections

Dans cette partie, on compare les valeurs maximales de déflexion sur les trois sections, à structures granulaire et bitumineuses, depuis l'ouverture de la voie au trafic commercial en juillet 2017 jusqu'au mois d'Avril 2019. D'où le graphique de la Figure 21 tracés pour les trains doubles à 30 bogies.

On peut remarquer que l'ordre de grandeur des valeurs maximales de déflexion des sections 2 et 4 sont relativement proches. Par contre, l'évolution de la déflexion de la structure sous ballast est différente dans le temps sur les sections 2 avec sous couche granulaire et 4 avec sous couche bitumineuse. On observe une stabilisation des valeurs de déflexion sur la section 4, indépendamment de la saison. Pas de stabilisation observée sur la section granulaire ; la déflexion varie avec les variations saisonnières.

En ce qui concerne la section 1 avec sous couche en GB mais un sol sableux avec une nappe peu profonde, les valeurs maximales de déflexion enregistrées pour les trains doubles à 30 bogies sont supérieures aux valeurs des deux autres sections à sol argileux.

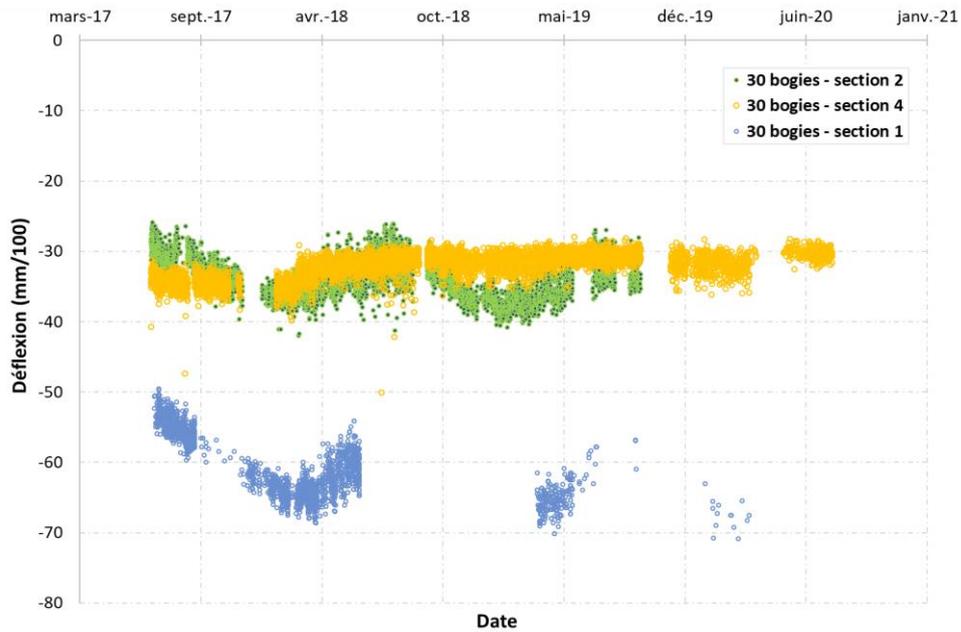


Figure 21 - Comparaison entre les valeurs maximales de déflexion mesurées sur la section 2 avec sous couche granulaire et les sections 4 et 1 avec sous couche bitumineuse

I.5.2 Accélérations verticales

Le traitement des accélérations verticales mesurées au sommet de la couche sous ballast dans les différentes sections de BPL, pour la phase d'exploitation commerciale de la ligne est décrit dans ce paragraphe, ainsi que le traitement des accélérations mesurées sur les traverses. Les valeurs maximales (positives) correspondent aux accélérations verticales dirigées vers le haut et les valeurs minimales (négatives) aux accélérations dirigées vers le bas.

Une vérification des méthodes de traitement utilisées pendant la thèse de D. Khairallah a été réalisée. Le suivi du traitement des mesures d'accélération sur traverse et au sommet de la sous couche jusqu'à Avril 2020 des 4 sections de BPL a aussi été effectué.

I.5.2.1 Emplacement des accéléromètres sous ballast

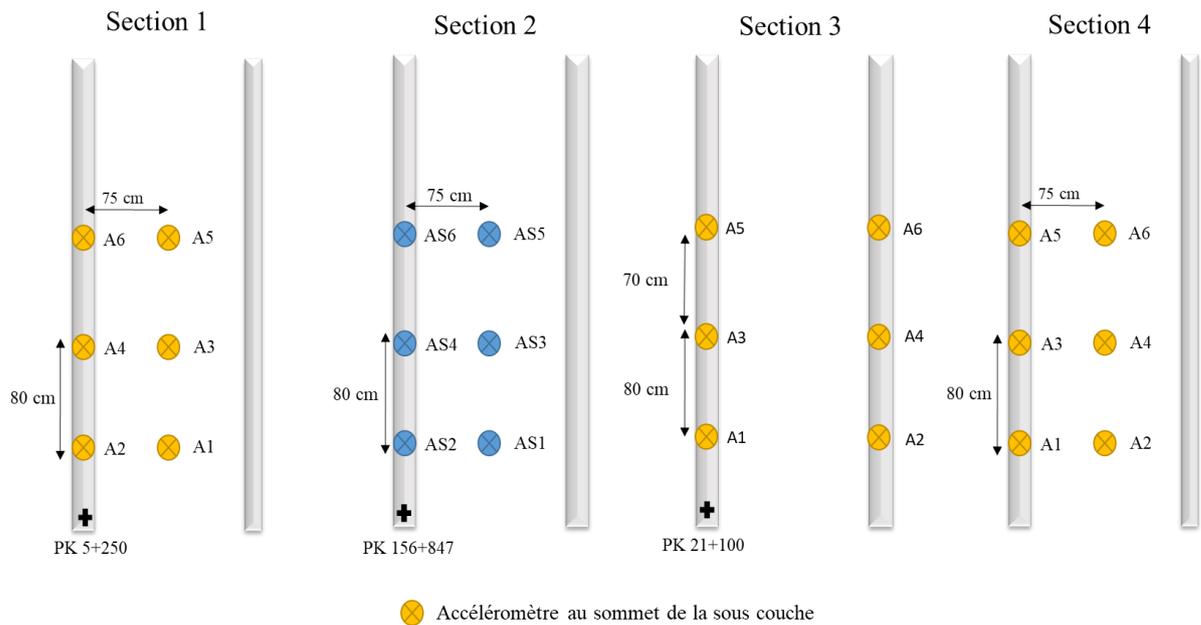


Figure 22 - Bilan d'instrumentation des accéléromètres au sommet de la sous-couche

L'instrumentation de la section 1 avec sous couche bitumineuse est considérée comme lourde en termes de nombre de capteurs dont 6 accéléromètres capacitifs (référence 2210-005) de la marque Alliantech au sommet de la sous-couche : 3 capteurs entre les rails et 3 sous le rail extérieur, espacés de 80 cm (dans le sens longitudinal).

La section 2, avec une sous-couche granulaire de 20 cm sous le ballast, est instrumentée, entre autres, avec 6 accéléromètres placés au sommet de la couche de GNT : 3 entre les rails et 3 sous le rail extérieur.

La section 3 avec sous-couche en courbe est instrumentée avec 6 accéléromètres repartis au sommet de la GB : 3 sous le rail intérieur, espacés de 80 cm et 3 sous le rail extérieur, également espacés de 80 cm.

La section 4, similaire à la section 1, est une section rectiligne, avec sous-couche bitumineuse. Son instrumentation comprend 6 accéléromètres au sommet de la sous-couche : 3 capteurs entre les rails et 3 sous le rail extérieur.

I.5.2.2 Emplacement des accéléromètres sur traverses

Les accéléromètres qui instrumentent les sections de la LGV BPL permettent de suivre le comportement dynamique de la voie des sections instrumentées.

Sur une traverse de la section 1 bitumineuse, deux accéléromètres A7 et A8 ont été installés. Quant à la section 2, 7 accéléromètres ont été mises en place : 5 sur le côté extérieur de 5 traverses consécutives, un sur l'intérieur d'une traverse et un sur le milieu de la traverse médiane. Deux capteurs instrumentent les traverses de la section 3 bitumineuse en courbe : un sur le côté extérieur d'une traverse et un autre sur le côté intérieur de la même traverse. Seul un accéléromètre est placé sur une traverse de la section 4 bitumineuse.

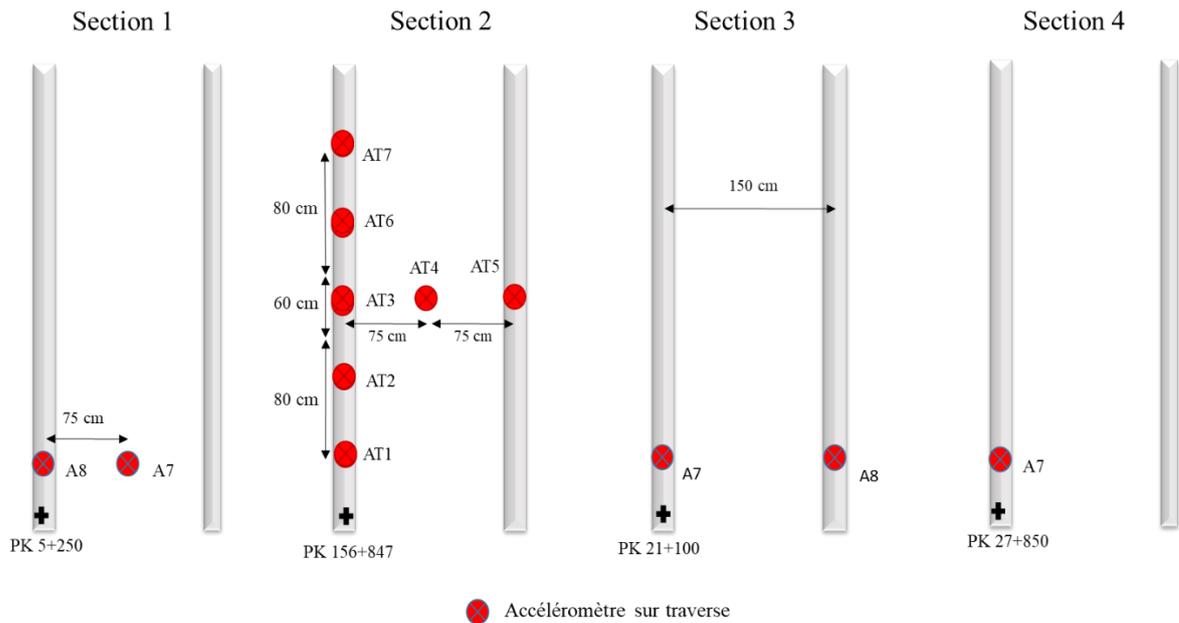


Figure 23 - Bilan d'instrumentation des accéléromètres sur traverse

I.5.2.3 Vérification du traitement des données

Pendant les travaux de thèse des procédures automatiques de traitement des données ont été mises en place en utilisant le logiciel Scilab. Les différentes routines qui ont été développées et programmées pour le traitement des données de la phase commerciale permettent de calculer une valeur maximale et minimale pour chaque signal, d'accélération verticale sous ballast, de trains passant sur les sections 2 et 4. Les opérations exécutées par ces routines sont les suivantes :

1. Lire les fichiers de données de la section à étudier pour la date désirée, à partir des données de mesure stockées sur le serveur.
2. Obtenir la date et l'heure exacte de passage de chaque TGV sur la section.
3. Calculer la vitesse du TGV passé à cette date comme expliqué dans la section 0.
4. Filtrer les signaux de capteurs enregistrés à l'aide d'un filtre passe-bas pour ce même passage (section I.3.1.2).
5. Déterminer le nombre de bogies du TGV circulant sur la voie : des TGV simples à 13 et 15 bogies, et des TGV doubles à 26 et 30 bogies
6. Tracer les signaux temporels des différents capteurs
7. Calculer les valeurs maximales et minimales des signaux des capteurs.

Ces étapes ont été programmées sur Scilab pour les 4 sections instrumentées.

Pour la suite de ces étapes et dans le but de considérer d'autres méthode de traitement des signaux d'accélération, on rajoute aux programmes une nouvelle étape :

8. Calculer le 1^{er} et 2^{ème} pic des signaux désignant les bogies moteurs du TGV supposés à charges constantes ainsi que la moyenne des pics du signal en question référant aux différents bogies du train (sans nécessairement superposer les signaux des bogies) (Figure 24).

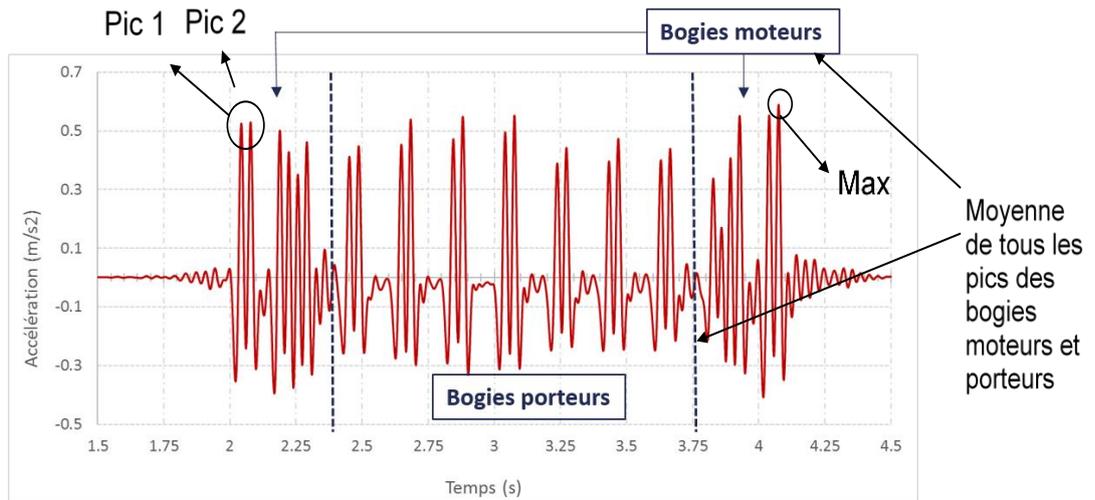


Figure 24 - Calcul du 1^{er} et 2^{ème} pic des signaux ainsi que la moyenne des pics du signal

Cette dernière étape a été exécutée pour les accélérations verticales au sommet de la couche de GB sur la section 4 à structure bitumineuse et sur les mesures des accélérations verticales sur les traverses de la section 2 à structure granulaire.

1.5.2.3.1 Section 4 bitumineuse

On a d'abord comparé l'évolution des valeurs maximales et minimales des accélérations verticales mesurées au sommet de la couche bitumineuse, des différentes méthodes de traitement : 1^{er} pic, 2^{ème} pic, la valeur maximale et minimale du signal et la moyenne des pics des bogies (Figure 24). Ces mesures ont été tracées sur la Figure 25 pour le capteur A6 et sur la Figure 26 la valeur pic et la moyenne pour le capteur A1, dans l'ordre chronologique de passage des trains. On rappelle que l'accéléromètre A1 est situé sous l'axe du rail et A6 entre les deux rails.

On voit que quelle que soit la méthode de traitement des mesures, les niveaux d'accélérations positives et négatives présentent une évolution quasi-identique, avec des légères variations des ordres de grandeur. Ces accélérations restent, dans tous les cas, regroupées autour de 2 niveaux principaux pour les accélérations positives, et aussi pour les accélérations négatives. L'accéléromètre A1 montre une diminution des accélérations après Février 2018. Pour l'accéléromètre A6, on observe des augmentations des accélérations à partir de Février 2018. Ces augmentations et diminutions dépendent de la position du capteur (inconnue) par rapport aux traverses. Pour conclure, focaliser l'étude sur le 2^{ème} pic du signal d'accélération, le pic du 2^e bogie moteur du train à 17t de charge quasi-constante, apparaît judicieux.

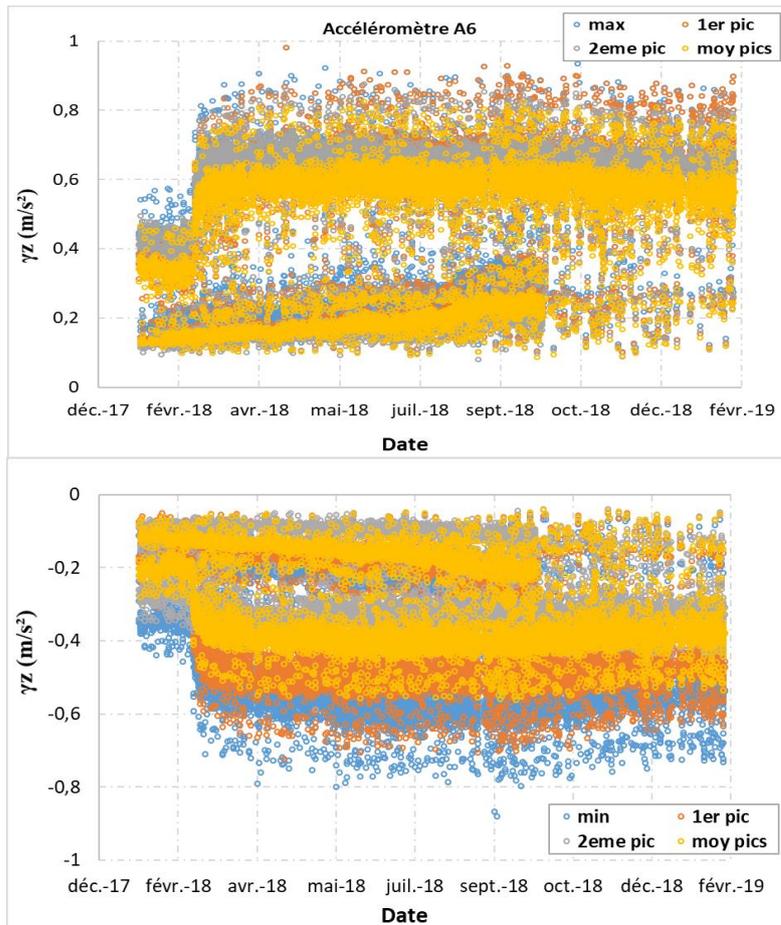


Figure 25 – Comparaison des méthodes du traitement des accélérations verticales maximales et minimales mesurées par l'accéléromètre A6 placé entre les deux rails, sur la section bitumineuse 4

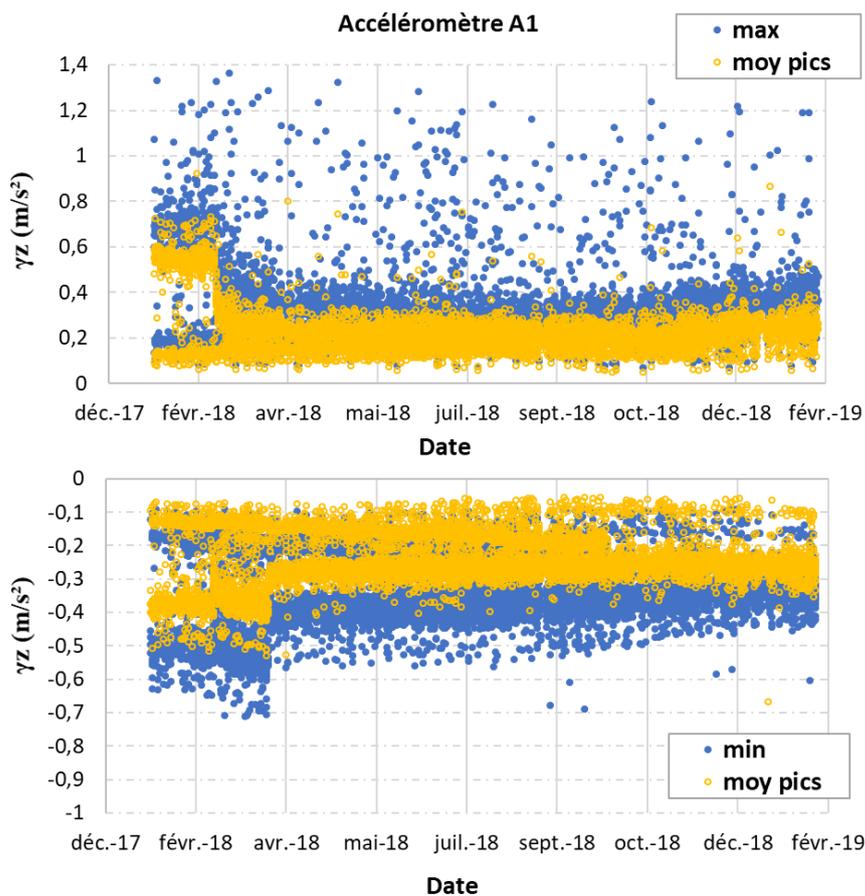


Figure 26 - Comparaison des méthodes du traitement des accélérations verticales maximales et minimales mesurées par l'accéléromètre A1 placé sous le rail, sur la section bitumineuse 4

1.5.2.3.2 Section 2 granulaire

La même étude est réalisée pour les accéléromètres sur traverse de la section 2 granulaire. Dans le graphique de la Figure 27, les valeurs maximales du signal sont comparées avec les valeurs du 2^{ème} pic du capteur AT3, et cela pour tous les types de train pour la période entre Juillet 2017 et Mai 2019. Les résultats montrent que ces deux paramètres tendent à varier semblablement. Cependant, la valeur pic du signal présente une courbe plus bruitée avec un nuage de valeurs aux alentours de 5 m/s².

En guise de conclusion, choisir le 2^{ème} pic du signal pour le traitement des mesures des accéléromètres sur traverse semble limiter les dispersions des mesures, vu qu'il réfère à un bogie moteur à charge est invariable.

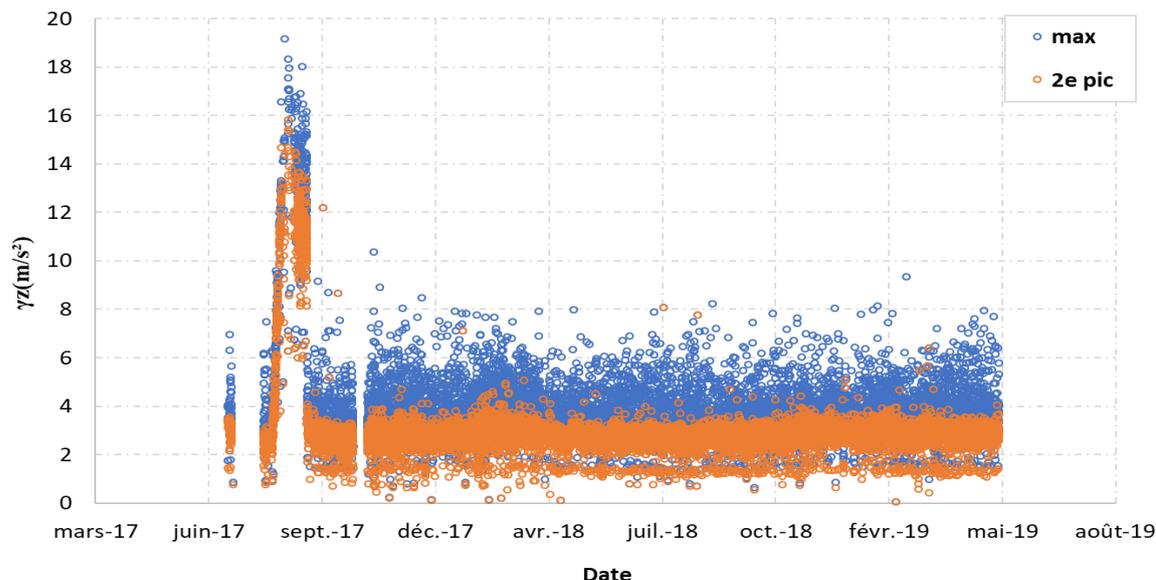


Figure 27 - Comparaison des méthodes du traitement des accélérations verticales maximales mesurées par l'accéléromètre AT3 placé sur traverse, sur la section granulaire 2

I.5.2.4 Résultats des mesures par section

➤ *Section 1 :*

➤ *Section 2 :*

On compare sur la Figure 28 les valeurs des pics des accélérations mesurées par le capteur AS2, situé sous le rail extérieur, pour les trains simples à 13 bogies et les trains doubles à 30 bogies et sur la Figure 29 celles du capteur AS6, situé sous le rail extérieur. Globalement, aucune influence des types de trains n'est observée sur les niveaux d'accélération produits. Les trains semblent produire deux nuages principaux de pics d'accélération positives et négatives, variant entre ± 1 et $\pm 2 \text{ m.s}^{-2}$.

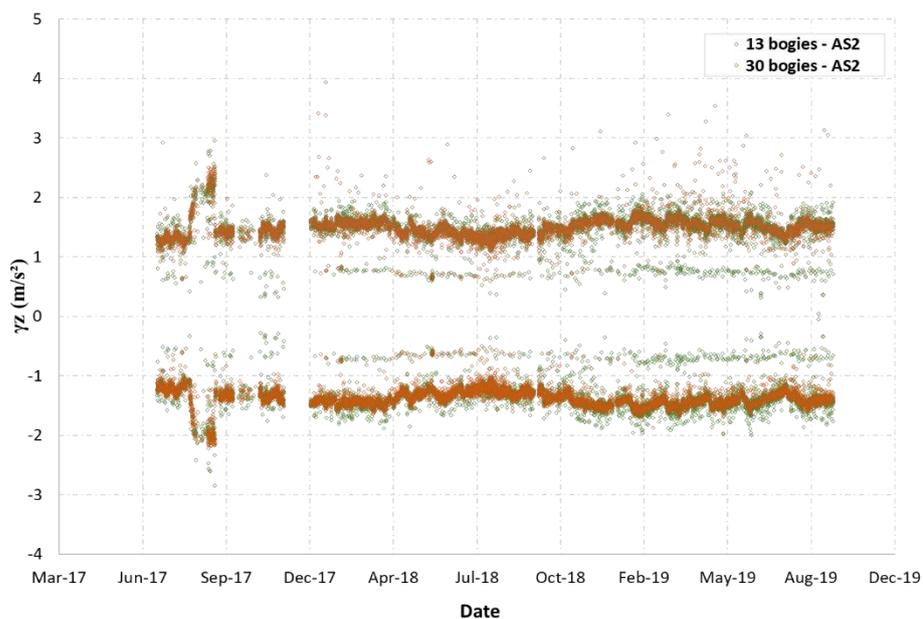


Figure 28 - Valeurs d'accélération verticales maximales et minimales de l'accéléromètre AS2, situé sous l'axe du rail extérieur, situé sur la section granulaire, en fonction du type de train, simple ou double

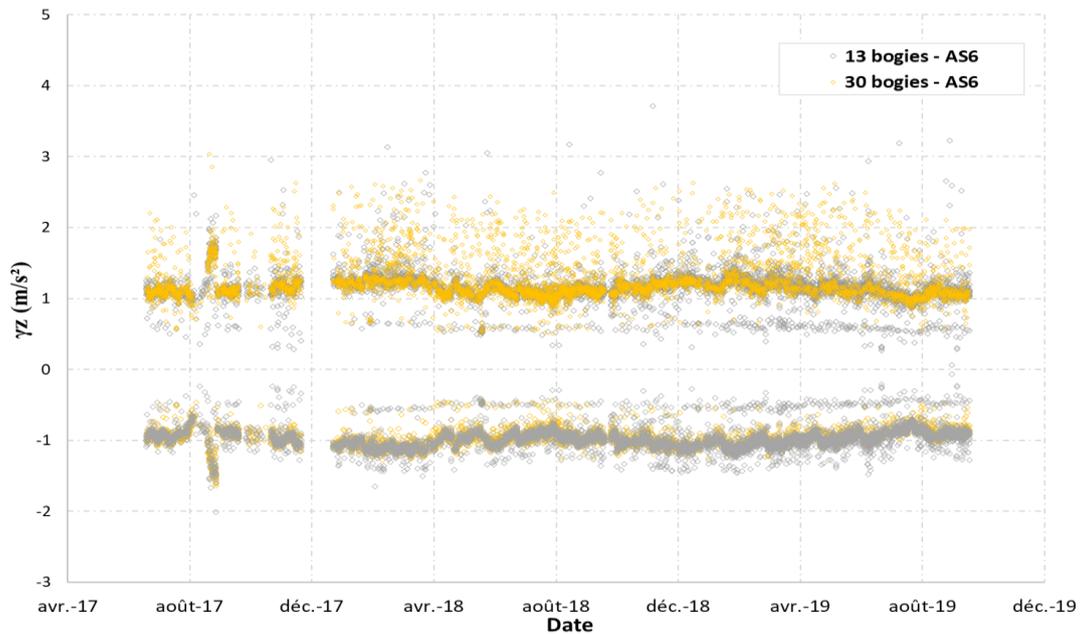


Figure 29 - Valeurs d'accélérations verticales maximales et minimales de l'accéléromètre AS6 situé sous l'axe du rail extérieur, situé sur la section granulaire, en fonction du type de train, simple ou double

On analyse également les valeurs du 2^{ème} pic positifs et négatifs des signaux d'accélération verticale sur traverse. Ces accélérations sont tracées sur la Figure 30 pour le capteur AT3 et AT7, par ordre chronologique de passages des trains. Ces deux accéléromètres sont placés sous le rail extérieur. On remarque que les accélérations sont assez stables pendant toute la période commerciale et présentent les mêmes plages d'accélérations ne dépassant pas $\pm 5 m.s^{-2}$, sauf pendant les mois Juillet – Août de l'année 2017. Durant cette courte période, les accélérations verticales apparaissent beaucoup plus élevées, allant jusqu'à $\pm 15 m.s^{-2}$.

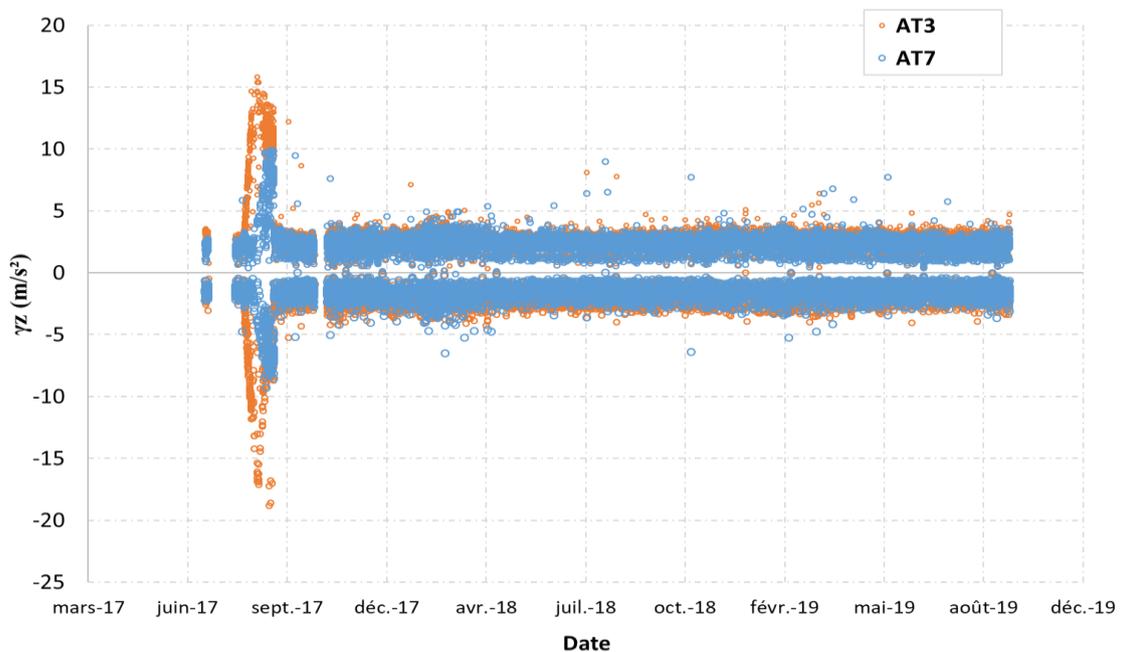


Figure 30 - Valeurs d'accélérations verticales maximales et minimales des accéléromètres AT3 et AT7, situés sur traverse de la section granulaire

Enfin, on compare les résultats des 3 capteurs situés au même endroit vis-à-vis de la traverse mais ayant des positions différentes sous les rails : AT3 sous le rail extérieur, AT4 entre les rails, et AT5 sous le rail intérieur. Le graphique de la Figure 31 montre une similarité entre les pics des accélérations verticales enregistrées avec ces capteurs : même évolution et même ordre de grandeur. A ce jour, aucune explication n'a été trouvée pour expliquer cette très forte augmentation des valeurs des accélérations, sur une courte période.

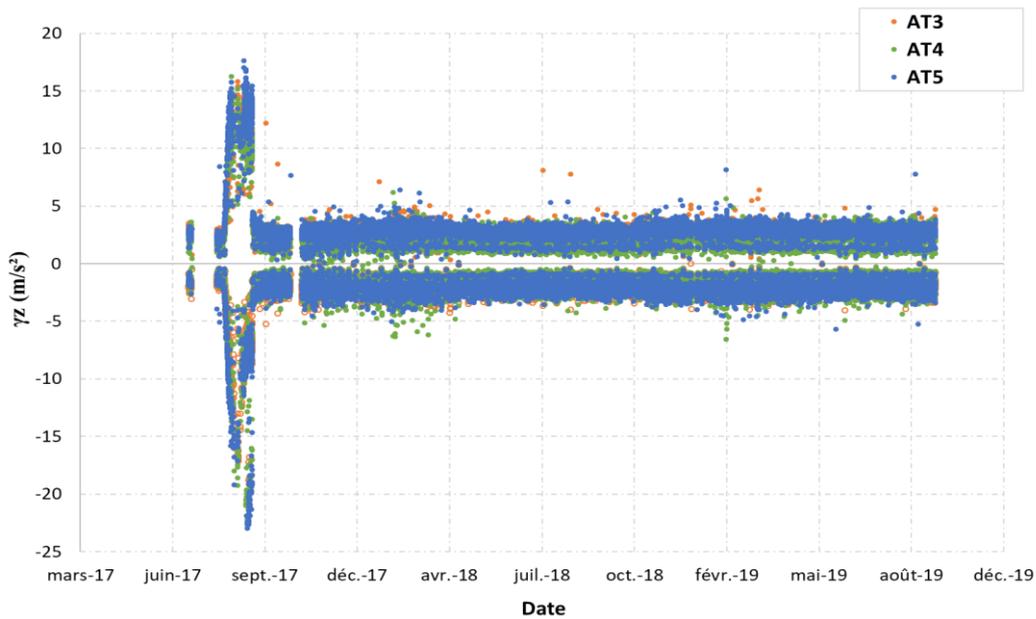


Figure 31 – Comparaison entre les valeurs d'accélérations verticales maximales et minimales des accéléromètres AT3, AT4 et AT5, situés au même endroit vis-à-vis de la traverse de la section granulaire

➤ Section 3 :

Sur la section 3, qui est en courbe, les accéléromètres au sommet de la couche de GB sont placés sous les deux rails : A1, A3 et A5 sous le 1^{er} rail et A2, A4 et A6 sous le 2^{ème} rail. Seul l'accéléromètre A4 fonctionne toujours sous le deuxième rail.

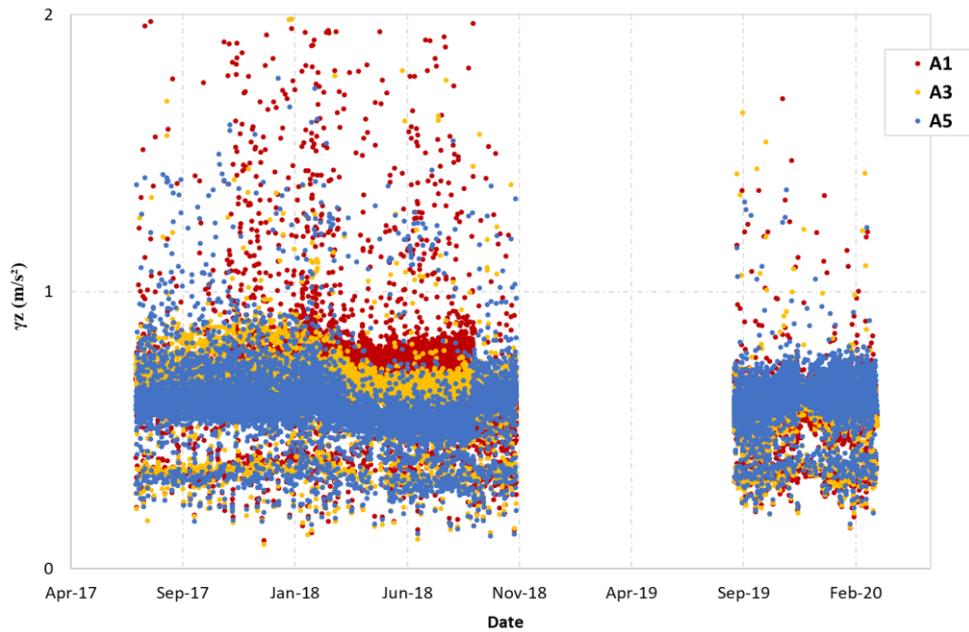


Figure 32 - Accélérations verticales maximales mesurées par les accéléromètres A1, A3 et A5, situés sous le rail extérieur, sur la section bitumineuse en courbe, par ordre des passages des TGV.

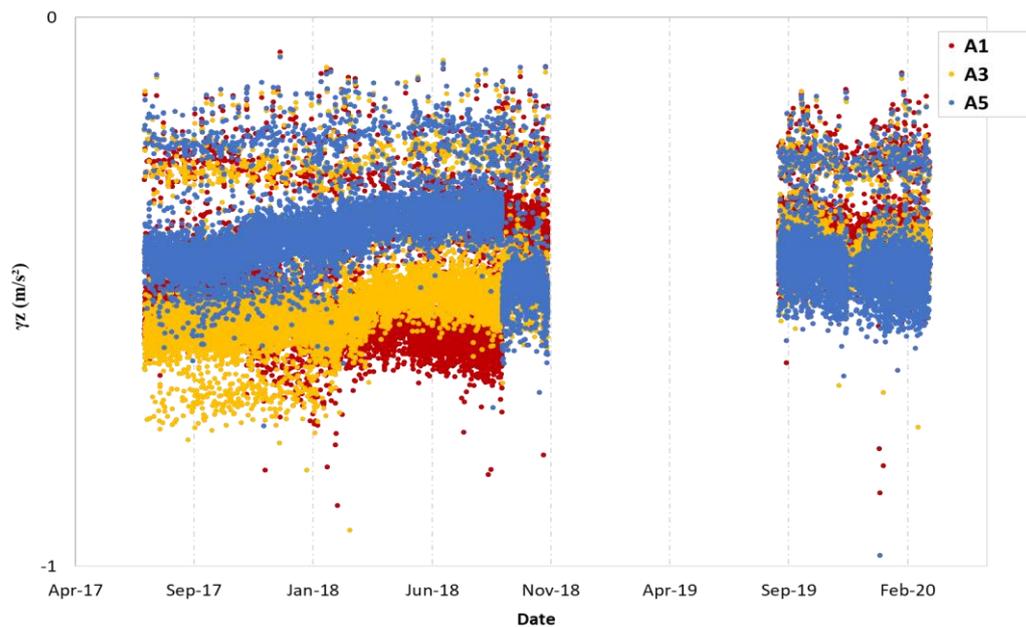


Figure 33 - Accélérations verticales minimales mesurées par les accéléromètres A1, A3 et A5, situés sous le rail extérieur, sur la section bitumineuse en courbe, par ordre des passages des TGV

La Figure 32 présentent les accélérations maximales dirigées vers le haut (positives) et la Figure 33 vers le bas (négatives) obtenues avec les différents capteurs sur la structure de voie avec sous-couche en grave bitume, en fonction de la date de passage des TGV simples et doubles. Les graphiques comparent les mesures des capteurs A1, A3 et A5 dont les positions sont différents vis-à-vis des traverses, tout en étant sous l'axe du même rail. Toutes les mesures positives montrent globalement la même tendance avec une légère variation des valeurs des 3 capteurs, ne dépassant pas 2 m/s^2 . Les pics d'accélérations les plus élevées sont détectées avec l'accéléromètre A1. Cette variation de mesures entre les accéléromètres de la section en courbe est plus accentuée sur les courbes négatives de la Figure 33.

De plus, un saut est détecté sur les courbes de ces capteurs en Septembre 2018 sans une explication précise. En revanche, ce même saut n'est pas observé dans la Figure 34 sur la courbe de l'accéléromètre A4 situé sous le rail intérieur. On remarque que les accélérations ne sont pas stables pendant toute la période de mesure. Elles semblent plus élevées pendant les périodes de Septembre et Janvier.

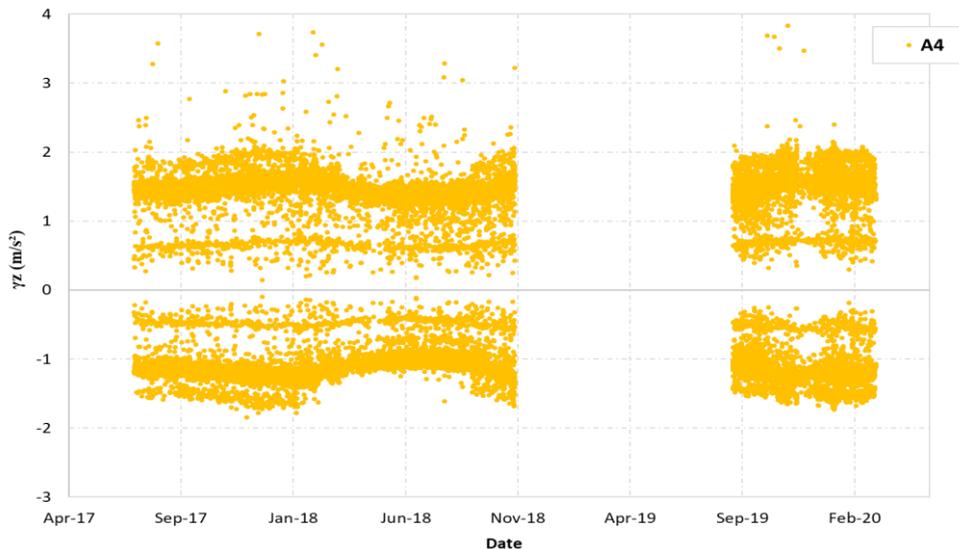


Figure 34 - Accélérations verticales maximales et minimales mesurées par l'accéléromètre A4, situé sous l'axe intérieur du rail, sur la section bitumineuse en courbe, par ordre de passage des TGV

D'autre part, vu les deux plages d'accélérations, dirigées vers le haut et vers le bas, pour tous les capteurs de la section, on regarde l'évolution des accélérations en fonction des vitesses de circulation des TGV. La Figure 35 présente les mesures des accéléromètres A1, A3 et A4, pour les trains doubles à 26 bogies. Elle montre une augmentation quadratique des valeurs d'accélérations positives et négatives avec la vitesse des TGV. Les mesures enregistrées avec le capteur A4, situé sous le rail intérieur de la section en courbe, sont plus élevées que les mesures des capteurs A1 et A3 sous le rail extérieur. En d'autres termes, la sollicitation du capteur sous la courbure intérieure du rail est plus forte que celle de la courbure extérieure.

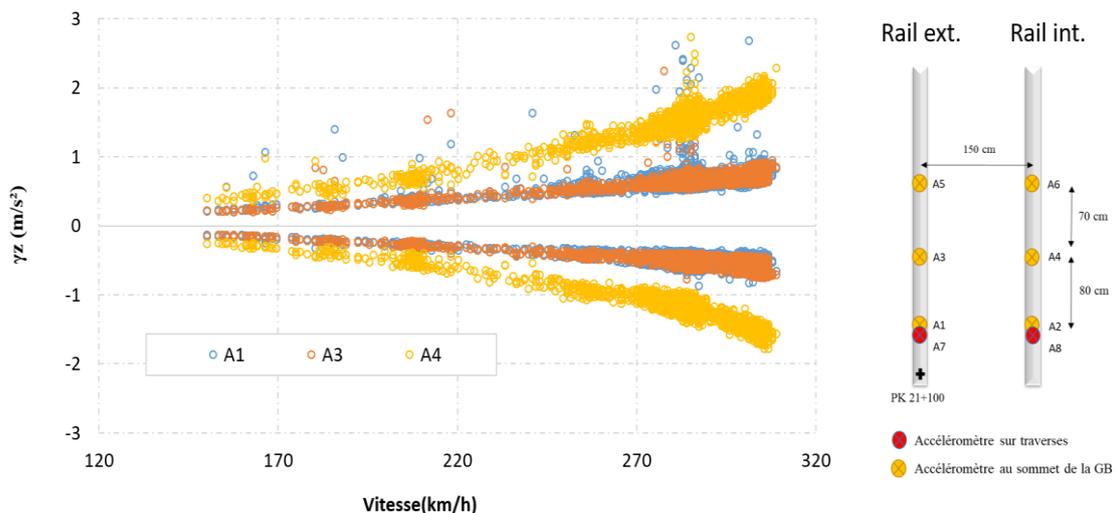


Figure 35 - Accélérations verticales maximales et minimales mesurées par les accéléromètres A1, A3 et A4, situé sous les rails, sur la section bitumineuse en courbe, en fonction de la vitesse de passage des trains.

Nous avons également analysé les mesures des deux accéléromètres A7 et A8 placés au sommet des traverses de la section bitumineuse pour la période de circulation. Les profils des réponses des pics

de ces accéléromètres sont illustrés sur la Figure 36. On peut voir que les mesures sont plus dispersées que celles obtenues dans les couches situées sous le ballast et atteignent au maximum environ $\{\gamma_z\}_{traverse}^{haut/bas} = \pm 5 m.s^{-2}$. Les accélérations sont nettement plus élevées que celles au sommet de la GB. L'écart entre les deux familles de courbes est large, supérieure à 50 %.

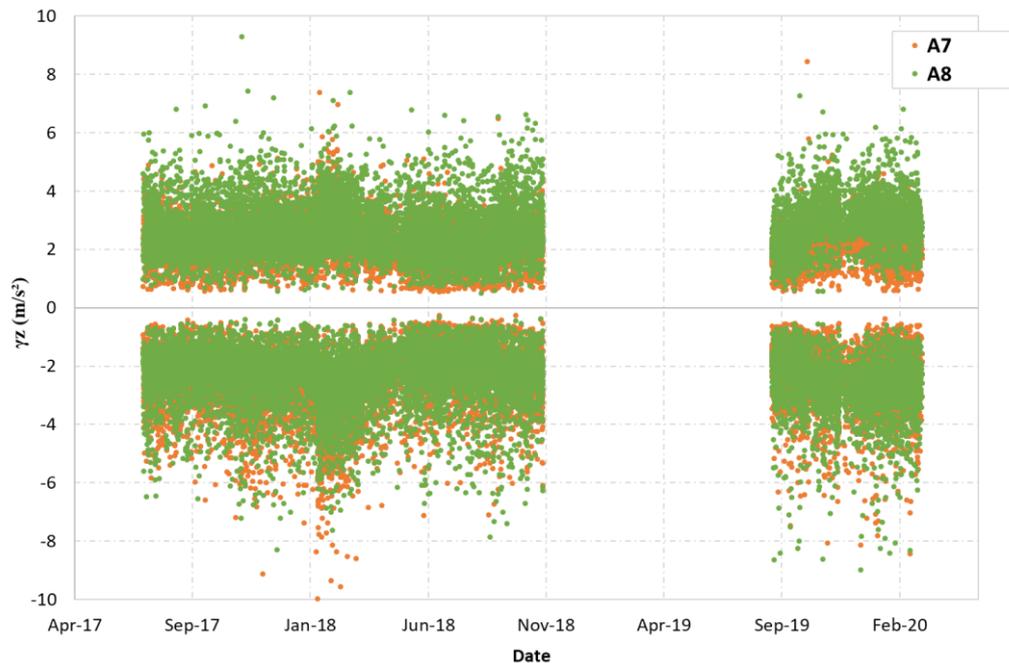


Figure 36 - - Comparaison des valeurs d'accélérations verticales maximales et minimales des accéléromètres A7 et A8 sur traverse de la section 3 bitumineuse en courbe

Par ailleurs, les profils de la Figure 37 comparent les résultats des capteurs A3 et A4, aillant une même position vis-à-vis des traverses et pour tout type de train (simple à 13 et 15 bogies, et double à 26 et 30 bogies). On observe que l'accéléromètre A4 enregistre les valeurs les plus élevées : $\{\gamma_z\}_{sommets\ GB}^{haut} = 2.4 m.s^{-2}$ et $\{\gamma_z\}_{sommets\ GB}^{bas} = 1.85 m.s^{-2}$.

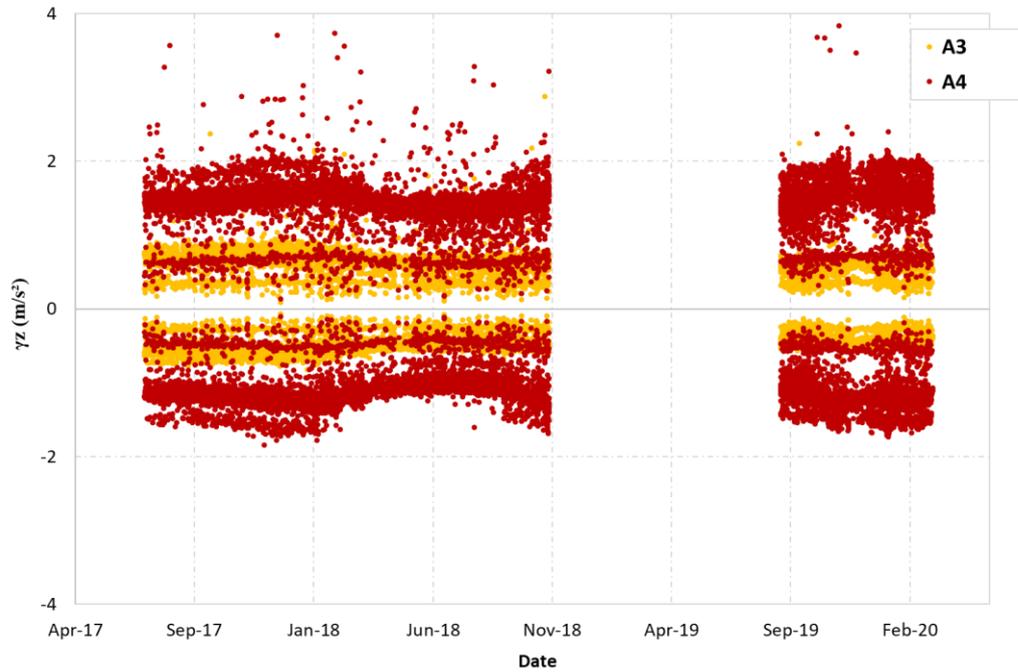


Figure 37 – Comparaison des valeurs d'accélérations verticales maximales et minimales des accéléromètres A3 et A4 sur la section 3 bitumineuse en courbe

➤ **Section 4 :**

Les différentes courbes des pics d'accélérations verticales positives (max) et négatives (min) des accéléromètres A1 et A6 au sommet de la couche de grave bitume, et de l'accéléromètre A7 sur traverse sont tracées dans la Figure 38 pour la période entre Septembre et Décembre 2017. Ces courbes mettent en évidence que l'accéléromètre sur traverse A7 enregistre des accélérations plus élevées que ceux placés sous le ballast.

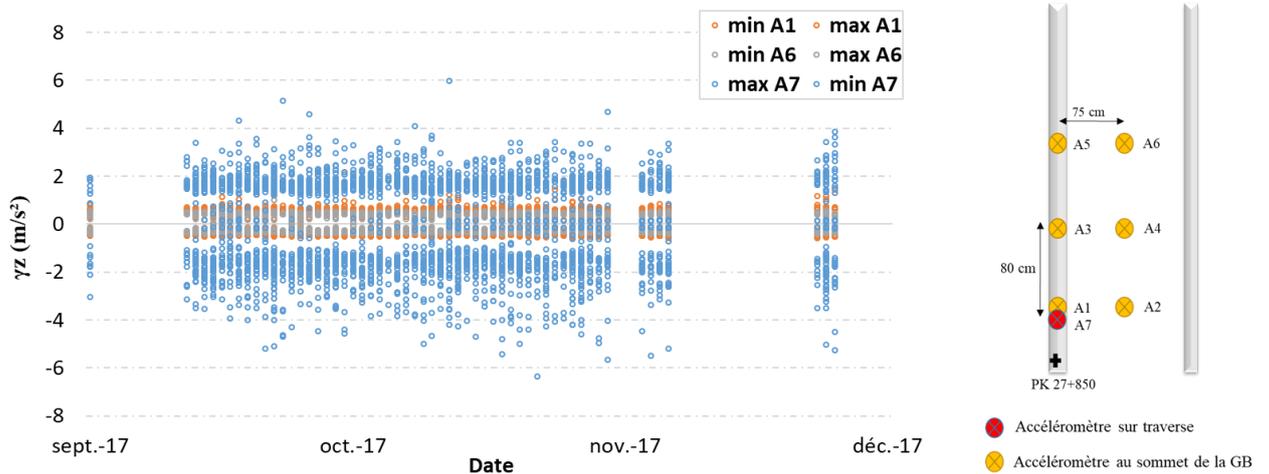


Figure 38 – Comparaison des accélérations verticales maximales et minimales mesurées sur traverse (A7) et au sommet de la sous-couche (A1 et A6) sur la section 4 bitumineuse, par ordre des passages des TGV

Le traitement et l'évolution des accélérations verticales au sommet de la sous-couche en GB sont détaillés par la suite dans la section **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

I.5.2.5 Comparaisons des mesures entre sections

Dans cette partie, on compare les résultats de mesures des accélérations sur traverse de la phase de circulation commerciale, obtenus sur la section 2 granulaire et 4 bitumineuse, depuis l'ouverture de la voie au trafic commercial en juillet 2017 jusqu'au mois de Décembre 2017 où le capteur de la section 4 ne fonctionnait plus.

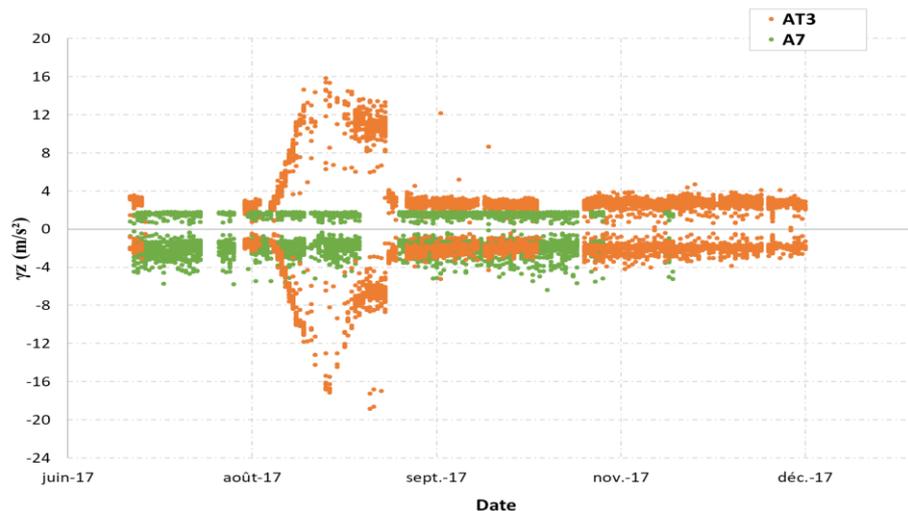


Figure 39 - Comparaison des valeurs d'accélérations verticales maximales et minimales des accéléromètres AT3 sur traverse de la section 2 granulaire et A7 sur traverse de la section 4 bitumineuse

La Figure 39 montre une comparaison des accélérations minimales et maximales pour les accéléromètres installés sur traverse : AT3 sur la section 2 avec sous-couche granulaire et A7 sur la section 4 avec sous-couche bitumineuse. On peut dire que les accélérations dirigées vers le haut, les accélérations maximales sur traverse de la section avec sous-couche en GB4 sont inférieures à celles mesurées sur traverse de la section avec sous-couche granulaire. Le graphique permet de retrouver la réduction d'un facteur deux des accélérations observées sous la couche de ballast de la section 4 pour la phase de montée en vitesse.

Concernant les accélérations dirigées vers le bas, la différence entre les mesures des sections n'est pas autant observable.

I.5.3 Jauges Verticales

Dans cette partie, on s'intéresse aux mesures des extensomètres verticaux (KM-100B) de la marque TML placés au sommet de la couche de GNT sur les différentes sections de BPL.

I.5.3.1 Emplacement des capteurs

Les jauges de mesure des déformations verticales ont été mises en place dans la couche de GNT pour mesurer les niveaux de déformation de la partie supérieure de la GNT.

Sur la section 1, 6 jauges verticales sont placées dans la couche de GNT : 3 sous le rail extérieur, espacées de 80 cm, 1 sous le rail intérieur et 2 à l'extérieur du rail extérieur, placées à 70cm du rail. Sur la section 2 avec une sous-couche granulaire, 6 jauges verticales sont placées dans la GNT : 3 sous le rail extérieur, 1 sous le rail intérieur et 2 à l'extérieur du rail extérieur. Quant à la section 4, 6 jauges de

déformations verticales étaient mises en place : 3 sous le rail extérieur, une sous le rail intérieur et 2 à l'extérieur du rail extérieur.

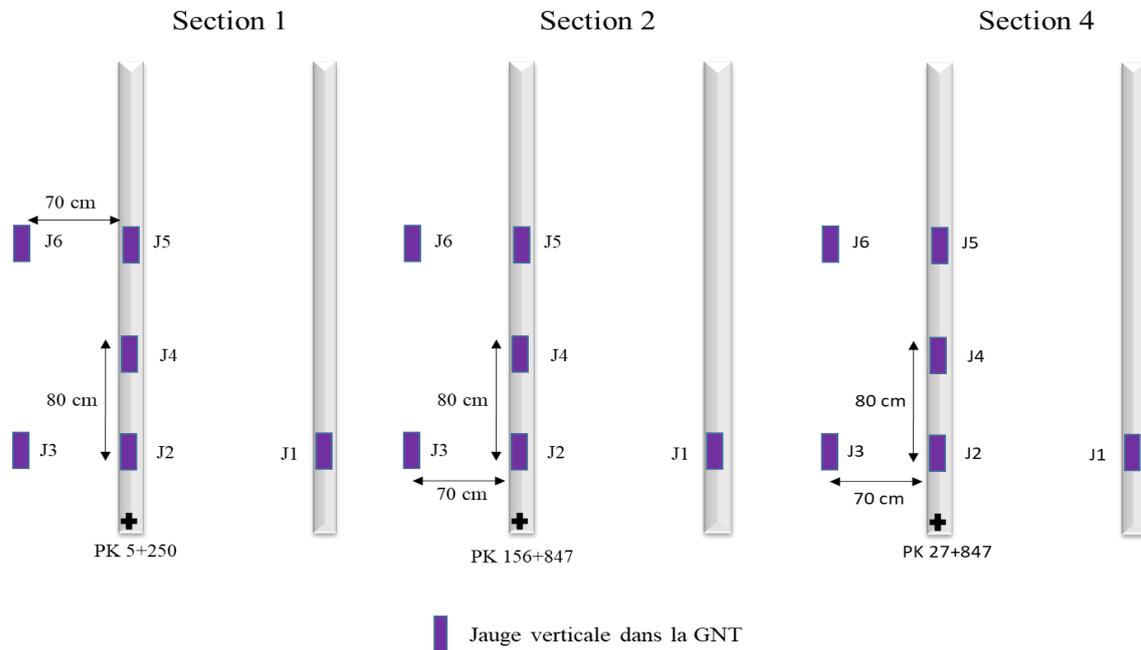


Figure 40 - Bilan d'instrumentation des jauges verticales

I.5.3.2 Test de différentes méthodes de traitement

En ce qui concerne les procédures automatiques de traitement des données des jauges, les étapes développées et programmées sont les suivantes :

1. Lire les fichiers de données de la section à étudier pour la date désirée, à partir des données de mesure stockées sur le serveur.
2. Obtenir la date et l'heure exacte de passage de chaque TGV sur la section.
3. Calculer la vitesse du TGV passé à cette date à partir d'un signal d'accélération verticale enregistré pour ce passage. (Comme pour les cas des mesures des accéléromètres)
4. Filtrer les signaux de capteurs enregistrés à l'aide d'un filtre passe-bas pour ce même passage.
5. Déterminer le nombre de bogies du TGV circulant sur la voie. (TGV simples à 13 et 15 bogies, et TGV doubles à 26 et 30 bogies)
6. Calculer les valeurs minimales des signaux des jauges (en valeur négative)

De plus de ces dernières opérations, une nouvelle étape est ajoutée :

7. Calculer le 2^e et le 8^e pic du signal des jauges verticales (en valeur négative) (Figure 41)

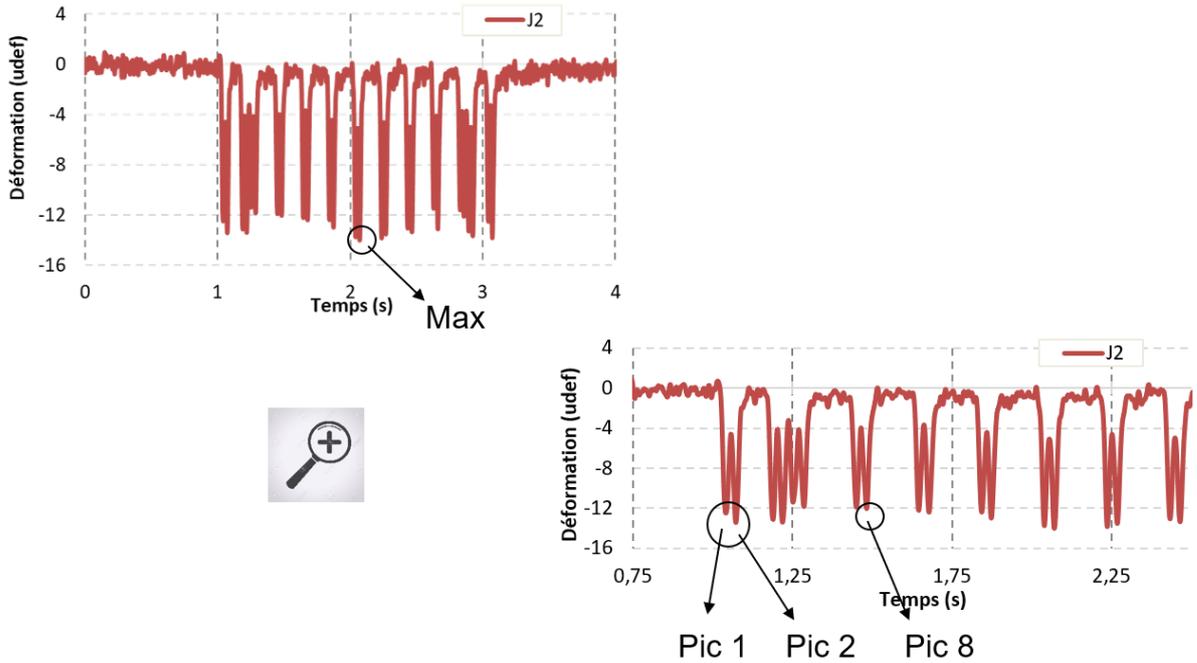


Figure 41 - Calcul des pics du signal des jauges verticales

On compare sur le graphique de la Figure 42 la valeur maximale, le 1^{er}, le 2^{ème} et le 8^{ème} pic des signaux de déformations verticales enregistrés sur la section granulaire 2 avec la jauge J2 les deux premiers jours de Juillet 2017. Les différents pics sont proches les uns des autres.

Pour le traitement des données, il semble donc tout à fait correct de considérer la valeur maximale du signal de déformation verticale .

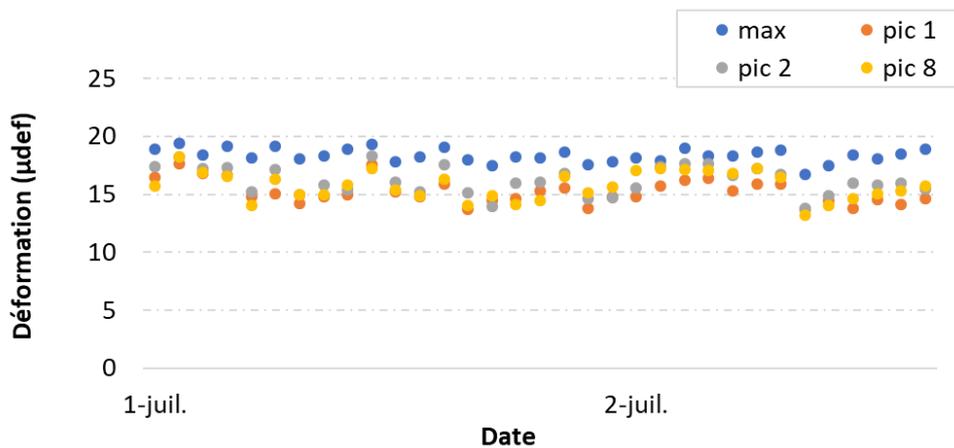


Figure 42 – Comparaison de la valeur maximale, le 1^{er}, le 2^{ème} et le 8^{ème} pic des signaux de déformations verticales enregistrés sur la section granulaire 2 avec la jauge J2

I.5.3.3 Résultats par section

Les valeurs minimales de déformation verticale obtenues sont présentées en valeur absolue dans la suite.

➤ **Section 1 :**

La réponse des 6 jauges verticales J1 à J6 mises dans la couche de GNT sous la couche de GB sont comparée sur la Figure 43 pour le mois d'Octobre 2017 sous trafic réel, pour tous les types de trains, simples et doubles.

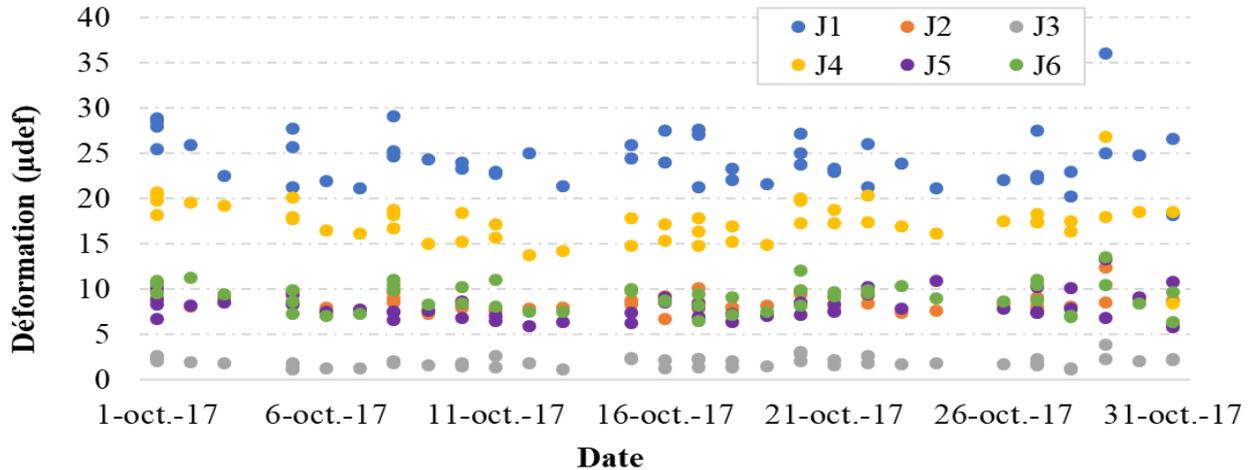


Figure 43 - Comparaison de la réponse des 6 jauges verticales J1 à J6 mises dans la couche de GNT de la section 1 bitumineuse

En observant la Figure 43, on remarque que la jauge J1, située sous l'axe du rail interne, présente les valeurs de déformations verticales les plus élevées dans la couche de GNT, variant entre 25 et 30 µdef. Les jauges situées en dehors des rails présentent des valeurs de déformations négligeables, voir nulles.

Pour la suite des résultats de la section 1, seules les déformations verticales enregistrées avec la jauge J1 sont présentées.

La Figure 44 montre les valeurs du 2^e pic des signaux enregistrés par la jauge J1 pour les mois : Octobre 2017, Février 2018, Juin et Septembre 2019, et Janvier et Juillet 2020. On peut voir que les valeurs de déformations dans la GNT de cette section ne dépassent pas 30 µdef pour les 3 ans de circulation, les valeurs mesurées sont très faibles. De plus, les variations saisonnières ne sont pas visibles sur l'évolution des déformations de la GNT de la structure bitumineuse

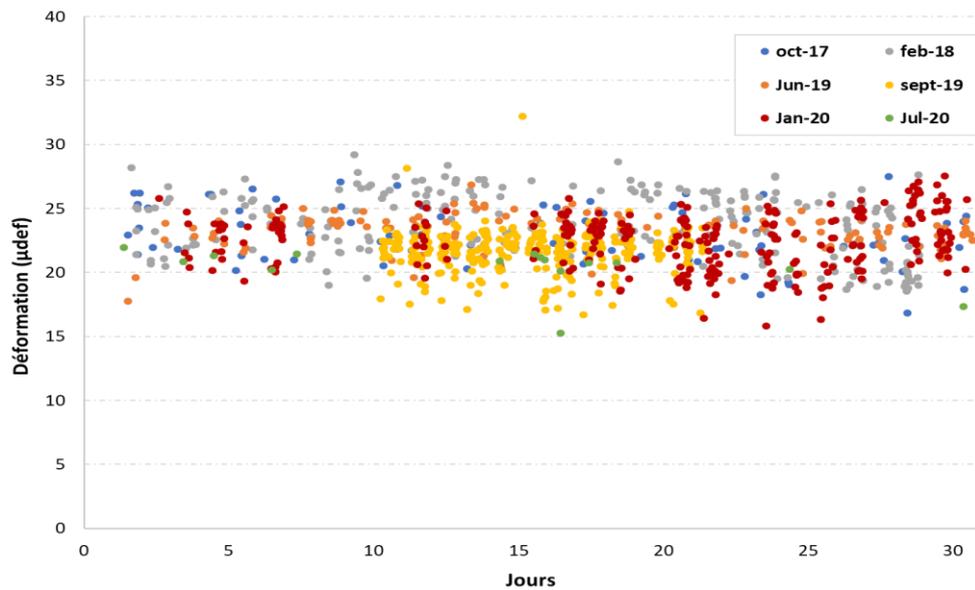


Figure 44 - Valeurs du 2^e pic des signaux de déformations verticales enregistrés par la jauge J1 pour différents mois de la phase commerciale, sur la section 1 bitumineuse

➤ **Section 2 :**

En se basant sur (**Khairallah 2019**), J2 est la jauge verticale signalant les déformations les plus élevées. L'extensomètre J2 est situé dans la couche de GNT de la section 2 granulaire sous l'axe du rail externe.

On présente sur la Figure 45 les valeurs du 2^{ème} pic des signaux de l'extensomètre J2. On peut remarquer d'après les résultats des différents mois traités (Octobre 2017, Février et Octobre 2018, et Août 2019) que la valeur du 2^{ème} pic du signal ne dépasse pas 20 μdef.

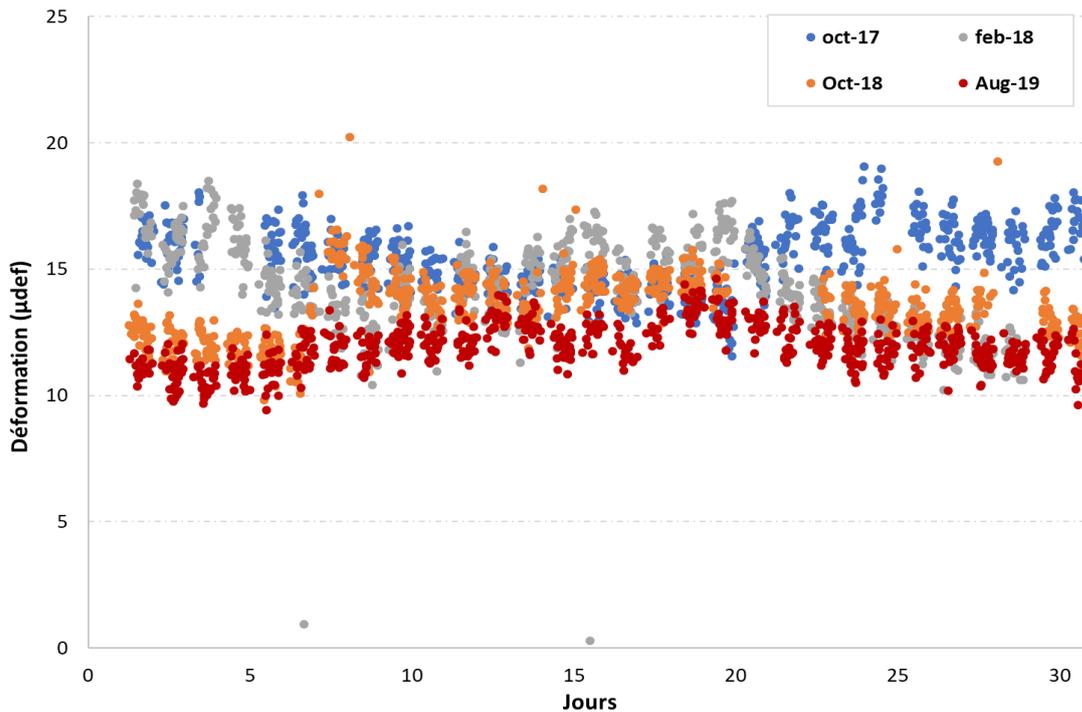


Figure 45 - Valeurs du 2^e pic des signaux de déformations verticales enregistrés par la jauge J2 pour différents mois de la phase commerciale, sur la section granulaire

➤ **Section 4 :**

Sur la section 4, les valeurs du 2^{ème} pic des signaux de la jauge J2, située dans la couche de GNT sous l'axe du rail, sont situées entre 10 et 15 µdef et ne présentent pas de variations saisonnières suivant le graphique de la Figure 46. Ce dernier illustre le traitement des mois suivant : Octobre 2017, Février 2018, Juin 2019, Janvier et Juillet 2020.

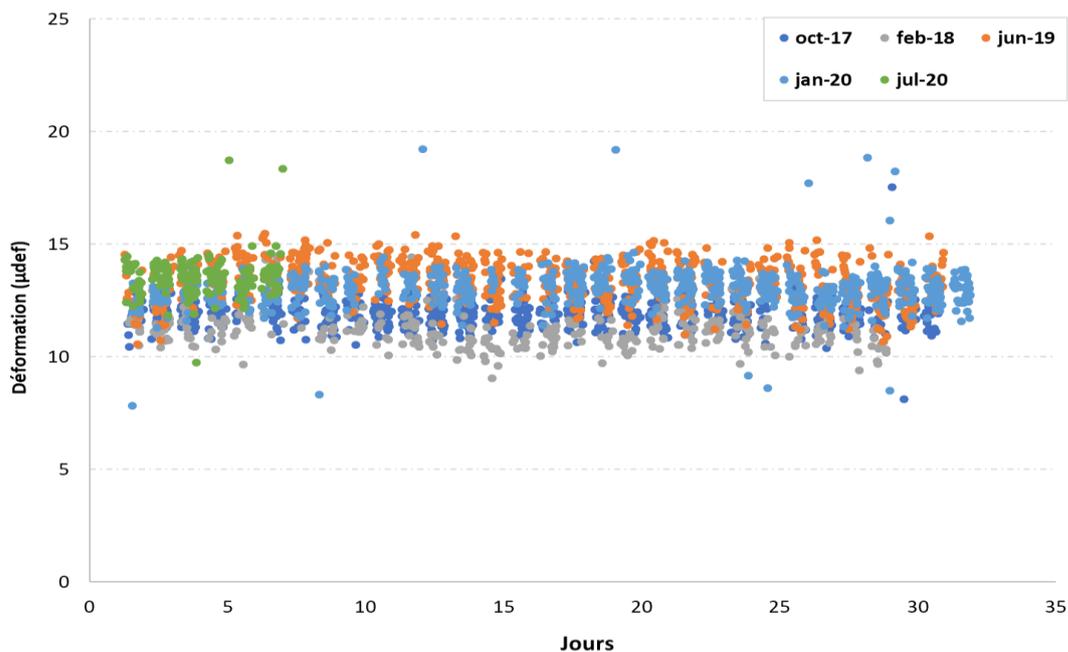


Figure 46 - Valeurs du 2^e pic des signaux de déformations verticales enregistrés par la jauge J2 pour différents mois de la phase commerciale, sur la section 4 bitumineuse

I.6 Jauges horizontales

I.6.1.1 Emplacement des capteurs

Pour instrumenter la couche de grave bitume sous ballast dans les sections 1 et 4 avec sous-couche en GB, il a été mis en place 7 jauges de mesure des déformations horizontales (KM-100HAS) de la marque TML (2 longitudinales L et 5 transversales T) à la base de la couche : 3 jauges T sous le rail extérieur, 1 L et 1 T sous le rail intérieur et 1 L et 1 T à l'extérieur du rail extérieur.

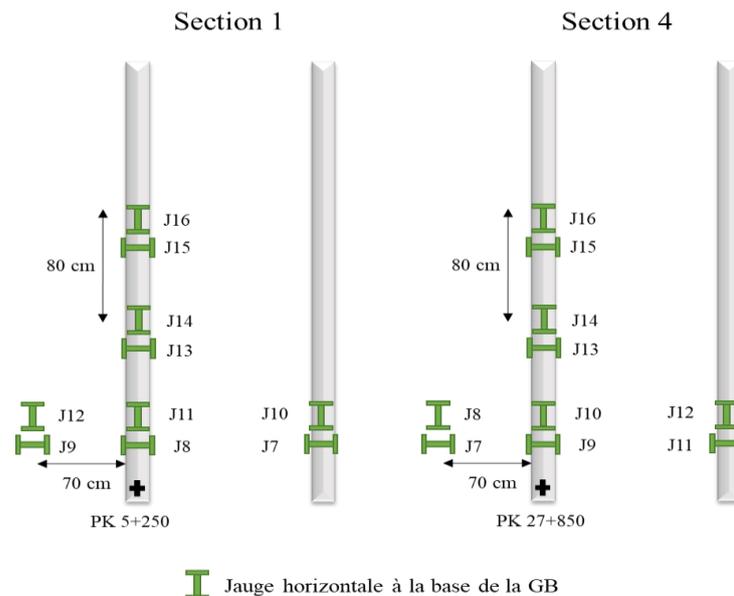


Figure 47 - Bilan d'instrumentation des jauges horizontales

I.6.1.2 Traitement des données

Comme pour le cas des jauges verticales, le même traitement de données a été appliqué pour les mesures des jauges horizontales, transversales et longitudinales. Les routines permettent de trouver la date et la vitesse du passage du TGV, de filtrer les signaux, de déterminer le nombre de bogies du TGV (simple ou double), et enfin de calculer une valeur minimale du signal des jauges.

I.6.1.3 Résultats par section

➤ Section 1 :

Sur la section 1, des jauges de déformations horizontales, transversales et longitudinales, sont placées à différentes positions dans la couche d'enrobé.

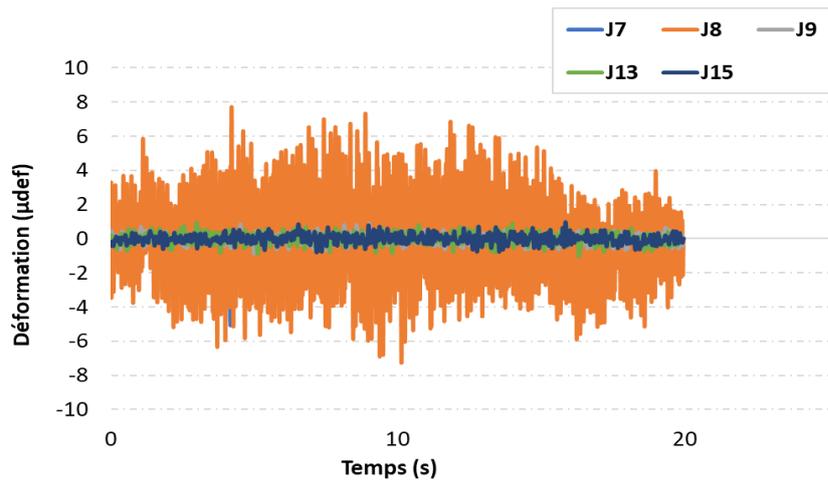


Figure 48 - Profils temporels filtrés de déformations horizontales placés en transversal à la base de la couche pour un passage de TGV le 1^{er} Octobre 2017 à 17h17 avec une vitesse de 285 km/h

La Figure 48 présente les profils temporels filtrés de déformations horizontales placés en transversal à la base de la couche pour un passage de TGV le 1^{er} Octobre 2017 à 17h17 avec une vitesse de 285 km/h. D'après le graphique, on peut constater que la jauge J8 présente les valeurs de déformation les plus élevées. Ses résultats seront adaptés par la suite pour vérifier l'évolution du déplacement en extension dans la couche de GB sur la section 1.

Le graphique de la Figure 49 montre les valeurs maximales de déformations de la jauge J8 tout au long de l'exploitation de la voie pour les périodes suivantes : Octobre 2017, Janvier-Février-Mars 2018, et Juin 2019. Aucune évolution des mesures des déformations horizontales dans le temps n'est observée.

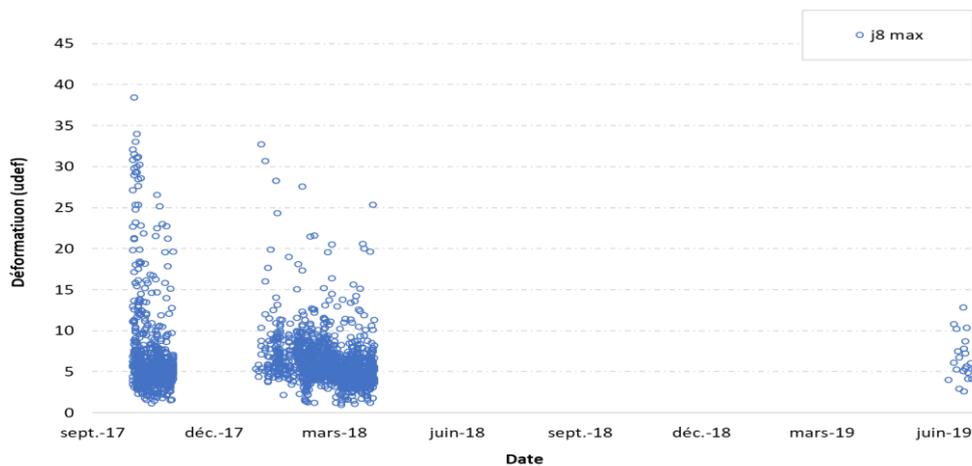


Figure 49 - Valeurs maximales des signaux de déformations horizontales enregistrés par la jauge J8 pour différents mois de la phase commerciale, sur la section 1 bitumineuse

➤ Section 4 :

Concernant la section 4, le traitement des mesures des jauges J9 transversale et J10 longitudinale, situé sous l'axe du rail à la base de la couche bitumineuse est présenté. Le choix de ces jauges est basé

sur les travaux de (Khairallah, 2019) indiquant que ces capteurs mesurent les valeurs de déformations horizontales les plus élevées.

La Figure 50 illustre les résultats de mesure des jauges J9 et J10 enregistrées sur différentes périodes tout au long des 3 ans d'exploitation de la LGV : Octobre 2017, Janvier-Mars-Juin-Octobre 2018, et Janvier-Mars-Juin 2019 et Février-Juin 2020. Cela permet d'évaluer les variations du comportement en fatigue de la couche de GB dans le temps. Durant les trois ans de suivi, aucune évolution des déformations longitudinales et transversales n'est observée.

Pour les trois ans de suivi, les valeurs de déformation en extension à la base de la couche de GB n'évoluent pas et restent très faibles, de l'ordre de 15 μdef au plus.

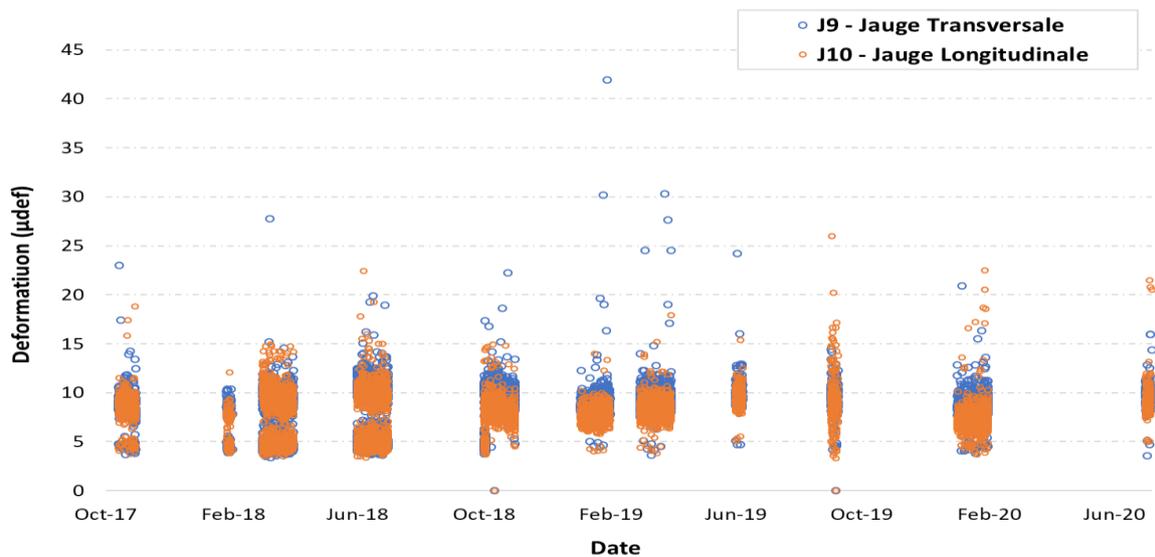


Figure 50 - Valeurs maximales des signaux de déformations horizontales enregistrés par les jauges J9 en transversale et J10 en longitudinale pour différents mois de la phase commerciale, sur la section 4 bitumineuse

I.7 Mesures continues des capteurs

I.7.1 Tassement des structures

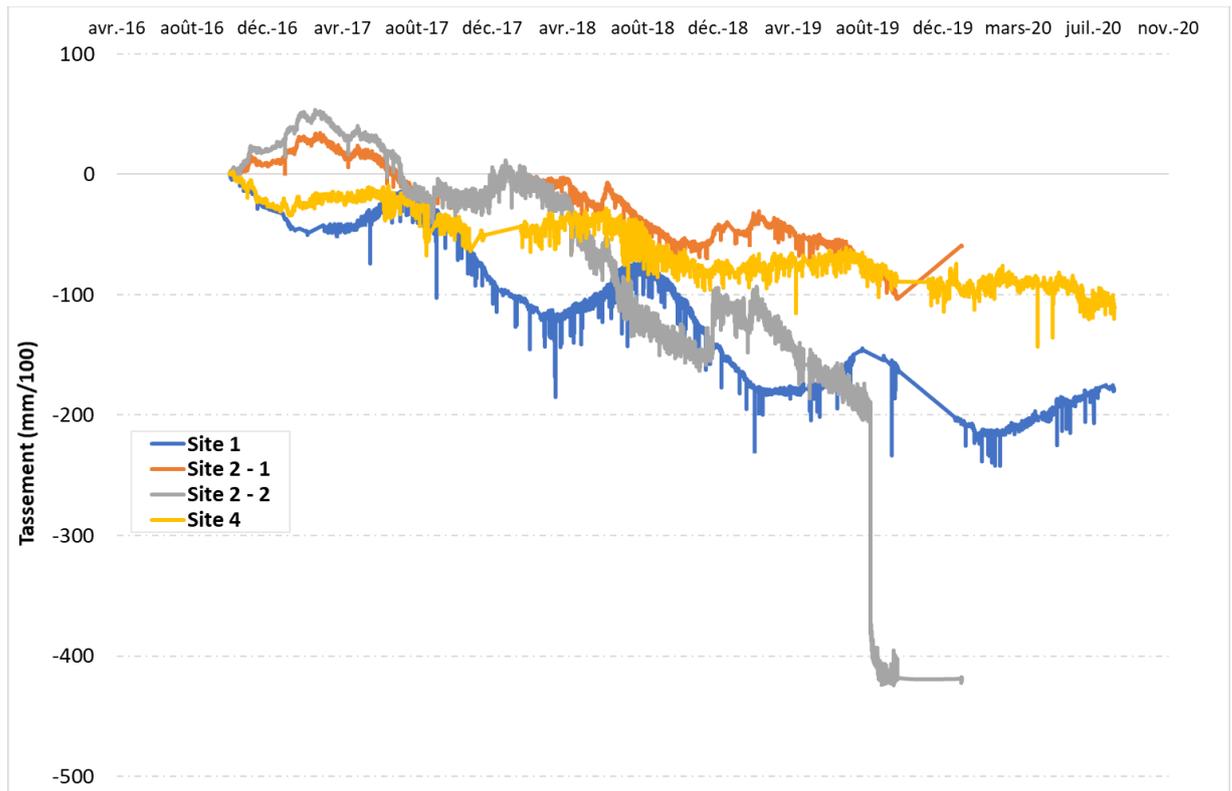
Dans cette partie, on s'intéresse aux mesures des capteurs ancrés de déflexion enregistrées en continu tous les 15 mins sur les différentes sections, indépendamment des passages des TGV. Les capteurs de déflexion mesurent le déplacement vertical jusqu'à 6 m de profondeur de la structure située sous la couche de ballast, qui représente le tassement de la voie.

Le sol de fondation contribue aux tassements de la voie. On rappelle que la section 2 granulaire et la section 4 bitumineuse sont construites sur un sol principalement argileux alors que le sol de fondation de la section 1 avec une sous-couche en GB est composé de sable fin avec une venue d'eau détectée à une profondeur de 4.5 m. La circulation est semblable sur toutes les sections et que les conditions météorologiques sont similaires, les sections 1 et 4 étant proches l'une de l'autre (environ 20 km) et la section 2 à une distance d'environ 120 km.

Le tassement vertical des structures des sections 1, 2 et 4 est tracé sur la Figure 51 pour la période entre Juillet 2017 et Juillet 2020, résumant 3 ans de service commercial pour les structures bitumineuses et granulaire. Un changement dans l'évolution des tassements verticaux est observé depuis juillet 2017, la date d'inauguration de la ligne au trafic commercial. Suite à l'ouverture de la voie au trafic, près de 30 TGV, par jour, chargés différemment traversent la LGV à une vitesse commerciale de 320 km.h^{-1} .

Une légère augmentation du tassement est perceptible sur toutes les sections après cette date et semble être plus importante sur la section 1, avec un sol sableux.

On en déduit du graphique que le sol de fondation des structures influence amplement le tassement de la voie.



I.8 Conclusion

Sur la LGV Bretagne – Pays de la Loire, une couche de grave bitume (GB4) sous le ballast a été construite sur 105 km de voie, sur une longueur totale de 182 km , afin d'améliorer la durabilité de la voie. Une instrumentation lourde a été mise en place sur quatre sections de la voie, comprenant 3 structures avec sous couche bitumineuse, et une structure classique avec assise granulaire. Les objectifs étaient d'analyser les mesures issues de cette instrumentation et de mieux comprendre le comportement à court terme et à long terme des deux structures différentes.

Une analyse des mesures enregistrées à partir de la mise en service de la voie BPL a été réalisée montrant l'évolution de la voie pour une durée de service de 3 ans.

La circulation des différents TGV a généré un grand nombre de fichiers de mesure, ont été traités avec plusieurs méthodes afin de conclure sur la plus pertinente. L'analyse de l'évolution des déflexions maximales et des accélérations maximales et minimales sur la durée de trafic commercial, a montré des niveaux comparables à ceux obtenus pendant la phase test avant l'ouverture de la ligne. Aucune différence significative entre les accélérations produites par les différents types de trains n'a été observée. Par contre, la réduction d'un facteur de deux entre les accélérations obtenues sur la section avec sous couche granulaire, et celles obtenues sur les sections avec sous couche bitumineuse, est retrouvée. D'où l'intérêt de la sous-couche en GB dans les structures ferroviaires.

Aucune évolution indiquant une dégradation de la voie n'a été observée jusqu'à présent.

Annexe

Traitement particulier γ_z au sommet de la GB – Section 4

La Figure 52 montre les valeurs maximales et minimales des accélérations au sommet de la couche de grave bitume de la section 4.

Il est possible d’observer, sur la Figure 52, que l’accélération verticale au sommet de la couche de grave bitume de la section 4 est divisée en plusieurs niveaux. Il était indispensable de vérifier de près ces ordres de grandeur et leur origine. D’où le traitement suivant, expliqué dans cette partie.

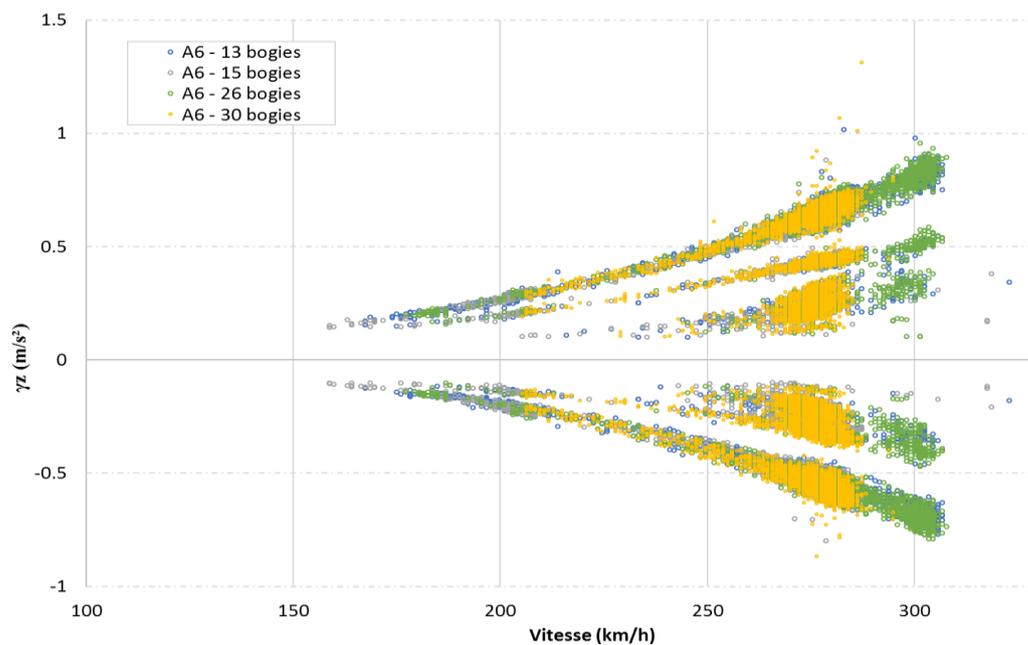


Figure 52 - Accélérations verticales maximales et minimales mesurées par l’accéléromètre A6, situé entre les deux rails, sur la section bitumineuse, en fonction de la vitesse de passage des trains.

On rappelle que la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** montre les valeurs maximales et minimales des accélérations. Les différents traitements présentés dans le Paragraphe I.5.2.3 ont permis de montrer que ces différentes valeurs d’accélérations n’étaient pas dues à la façon de traiter les données. Il faut donc vérifier les signaux de trains filtrés et non filtrés ainsi que leurs signaux de déflexion relatifs aux différentes plages d’accélération.

Le traitement est réalisé pour les mesures des accéléromètres A1 situé sous l’axe du rail et A6 situé entre les rails au sommet de la couche de la section à structure bitumineuse.

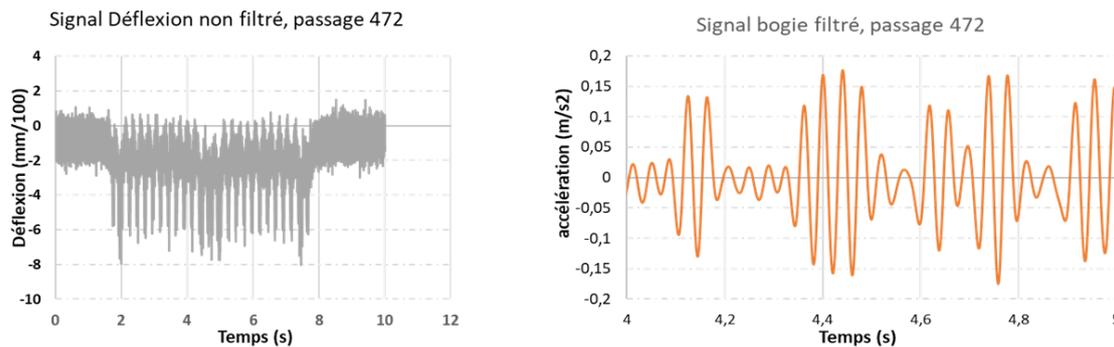


Figure 53 – Signal de déflexion non filtré pour un passage de train – signal d’accélération filtré d’un bogie de ce même passage de TGV le 11 Février à 12h14 sur la section 4

Pour le mois de Février 2018, deux passages de TGV doubles à 30 bogies passant à une vitesse de $V=270$ km/h ont été étudiés en détail : le 1^{er} passage le 11 Février à 11h47 ayant $\{\gamma_z\}_{A6}^{haut} = 0,3$ $m.s^{-2}$ et le 2^{ème} le même jour à quelques minutes près à 12h14 ayant $\{\gamma_z\}_{A6}^{haut} = 0,15$ $m.s^{-2}$. La Figure 53 présente le signal de déflexion non filtré ainsi que le signal d’accélération filtré d’un bogie pour le 1^{er} passage du TGV à 11h47. L’étude du signal de déflexion du 2^{ème} passage a montré un ordre de grandeur ne dépassant pas 10 $mm/100$ et un signal d’accélération non filtré dont la valeur maximale ne dépasse pas 1 $m.s^{-2}$ (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Le même résultat, en termes d’ordre de grandeur des mesures de déflexion, a été remarqué pour d’autres comparaisons de passages ayant une vitesse et un type de train identique et se trouvant dans des niveaux d’accélération différents pour le mois de Février et aussi Avril et Juin 2018.

Il est possible d’en déduire que ces passages de TGV avec des niveaux d’accélération très faibles, liés à des niveaux de déflexion très faibles sont des TGV qui circulent sur la voie située à côté de la section instrumentée. Il est donc nécessaire de bien étudier en détail les signaux complets.

La prochaine étape à faire était de retraiter ces mesures d’accélération verticales en supprimant les passages de TGV sur l’autre voie. Pour cela, tous les signaux avec des valeurs de déflexion inférieures à 20 $mm/100$ (correspondant à des signaux de trains circulant sur la voie à côté de la voie instrumentée) ont été supprimés. De ce fait, tous les passages de trains ayant des valeurs maximales de déflexion inférieures à 20 $mm/100$ étaient retranchés du graphique de la Figure 25. Il en résulte le graphique de la Figure 54.

L’évolution des mesures d’accélération en fonction de la vitesse des trains est retracée dans le 1^{er} graphique de la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

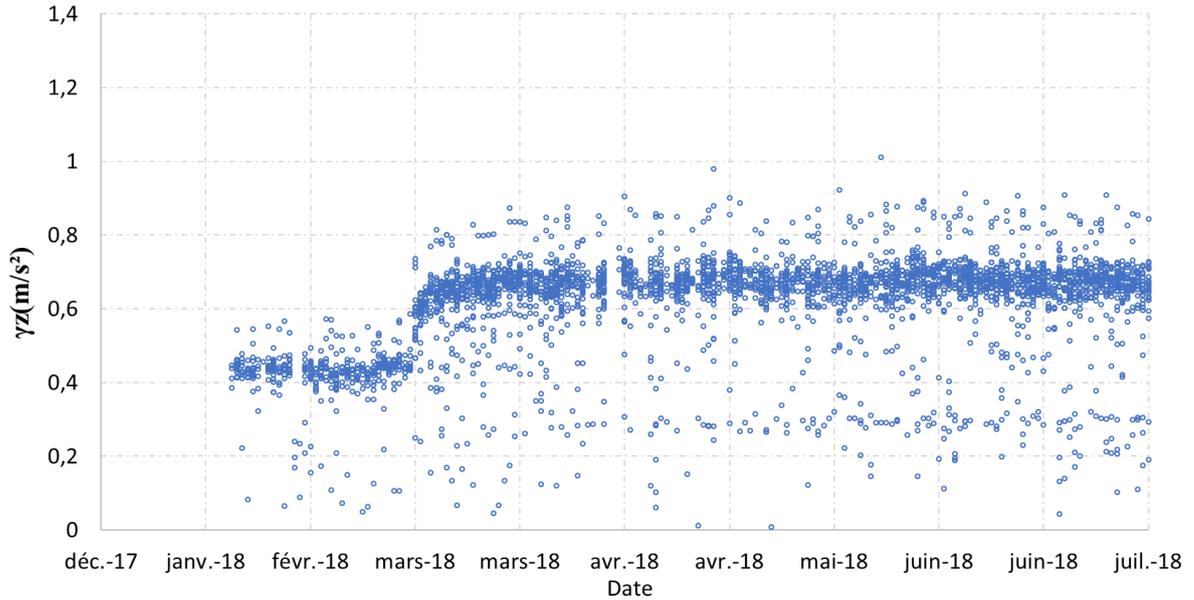


Figure 54 - Valeurs maximales d'accélérations verticales sur la section 4 bitumineuse après suppression des mesures enregistrées relatives aux passages de TGV sur l'autre voie

D'après les graphiques de Figure 55 traçant γ_z par ordre croissant des vitesses des trains, on peut remarquer la présence de 3 niveaux d'accélérations :

Lister les trois niveaux d'accélération

- Niveau 1 : γ_z entre 0.1 et 0.3 m/s² en fonction de la vitesse des trains
- Niveau 2 : γ_z entre 0.2 et 0.6 m/s² en fonction de la vitesse des trains
- Niveau 3 : γ_z entre 0.1 et 1 m/s² en fonction de la vitesse des trains

En retranchant la période avant Mars 2018, on élimine un niveau d'accélération comme le montre le 2^{ème} graphique de la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** La cause de ce saut demeure pour l'instant inexpliquée.

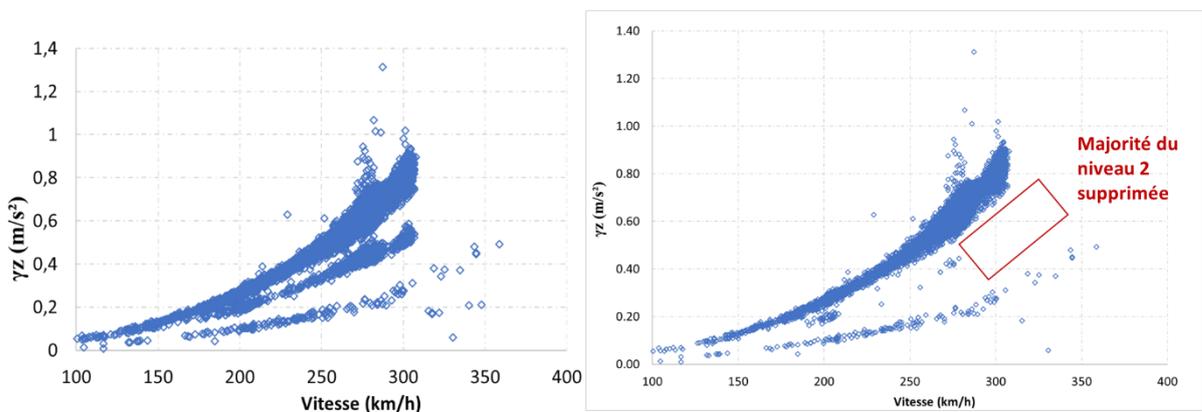


Figure 55 - Evolution des mesures d'accélération sur la section 4 en fonction de la vitesse des trains avant et après suppression des mesures enregistrées avant Mars 2018

L'étape suivante était de regarder la différence des passages appartenant aux deux plages restantes (présentées sur la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, à droite). Les pics d'accélération enregistrés

uniquement durant le mois de Février 2018 sont présentés sur la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** On remarque une évolution quadratique de la courbe en fonction de la vitesse et 3 points éloignés de ce fuseau principal et ayant les vitesses les plus élevées. Ces 3 passages ont un signal de déflexion classique et un signal d'accélération, sans filtrage, de l'ordre de $20 m.s^{-2}$. Ce qui est intéressant pour ces passages est l'allure du signal d'accélération filtré présenté sur la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** pour les trains passant le 6 Février 2018 à 18h22 et le 11 Février 2018 à 15h42.

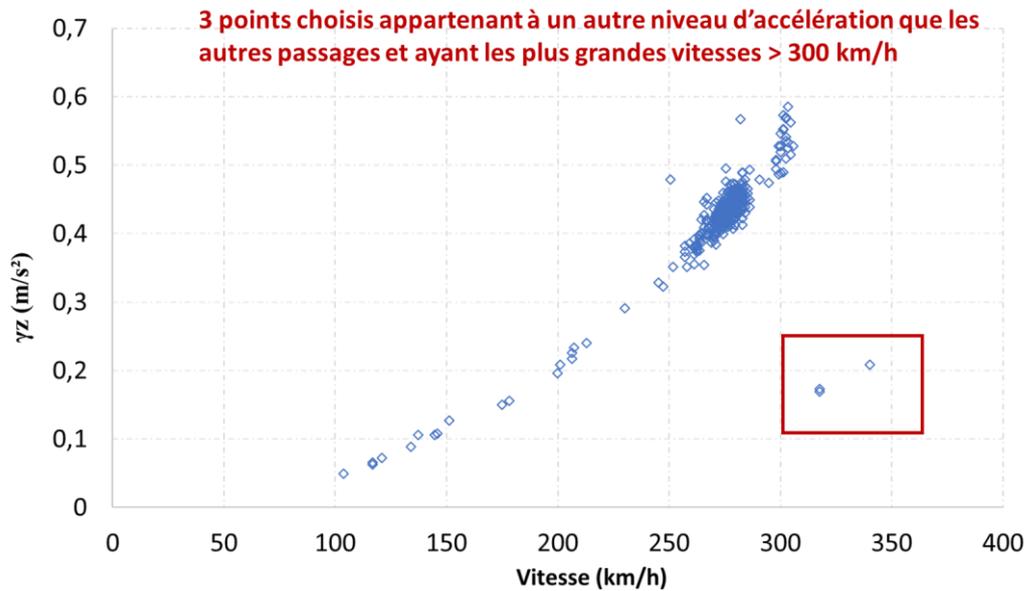


Figure 56 - Evolution des pics d'accélération sur la section 4 en fonction de la vitesse des trains enregistrés uniquement le mois de Février 2018

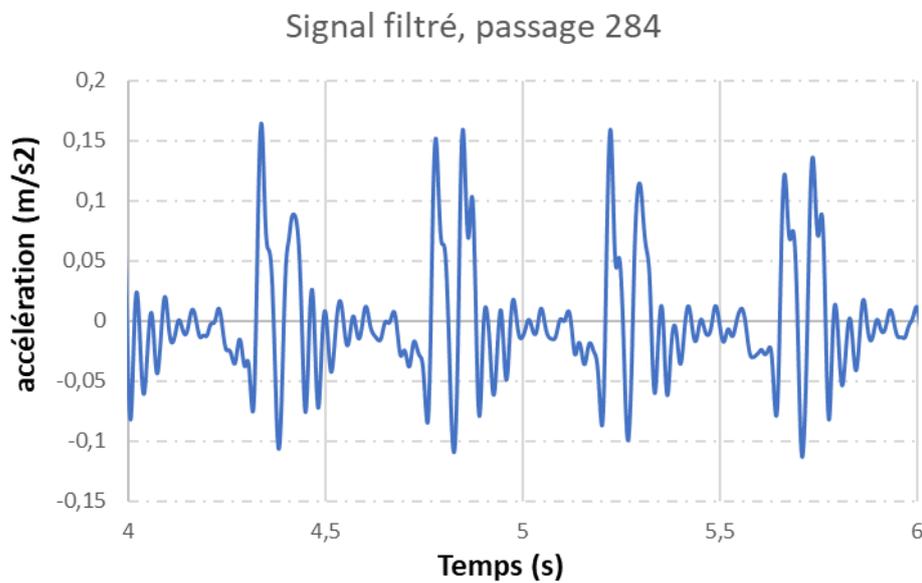
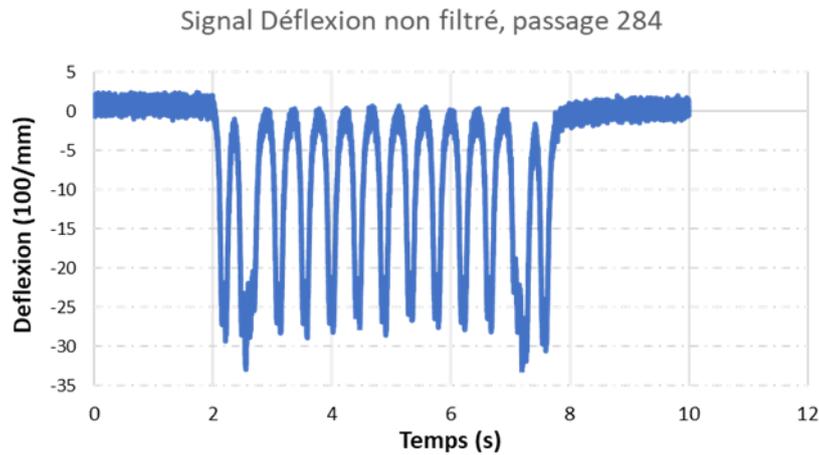


Figure 57 - Signal de déflexion non filtré pour un passage de train – signal d'accélération filtré d'un bogie de ce même passage de TGV le 6 Février à 18h22 sur la section 4

Prenons à titre d'exemple 3 passages de TGV à $V= 250 \text{ m.s}^{-1}$ enregistrés durant le mois de Mars 2018 et ayant 3 ordres de grandeurs d'accélération verticales différentes : $\{\gamma_z\}_1^{\text{haut}} = 0.15 \text{ m.s}^{-2}$, $\{\gamma_z\}_2^{\text{haut}} = 0.3 \text{ m.s}^{-2}$ et $\{\gamma_z\}_3^{\text{haut}} = 0.5 \text{ m.s}^{-2}$. Les signaux d'accélération filtrés de ces 3 passages sont présentés sur la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** Pour ces trois signaux, l'accélération maximale non filtrée est comprise entre 10 et 15 m.s^{-2} environ (Figure 58).

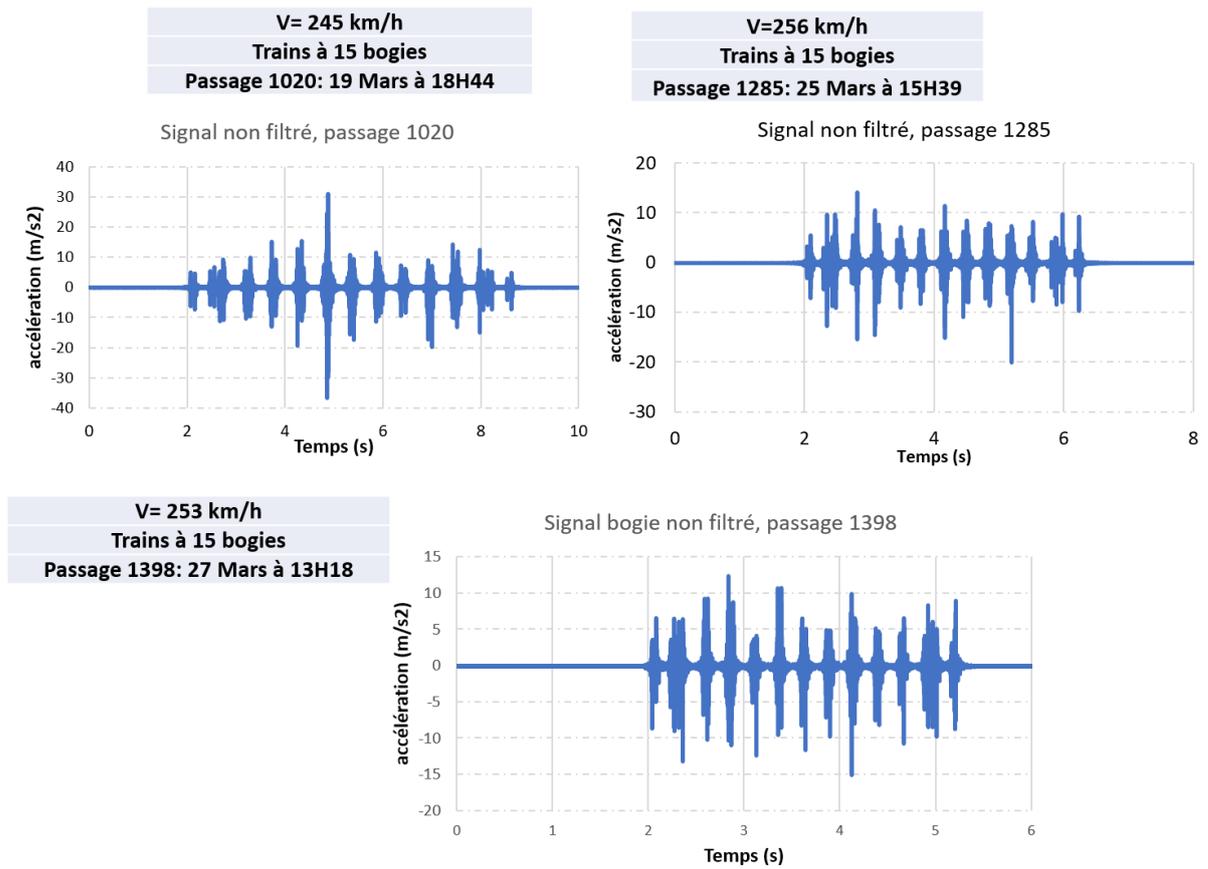


Figure 58 - Signaux d'accélération non filtrés d'un TGV simple à 15 bogies passant sur la section 4 en Mars 2018 à une vitesse de 250 m/s (± 5)

Il est possible d'observer sur le 1^{er} graphique de la Figure 59 que la forme du signal d'accélération (correspondant à un niveau de γ_z faible) est très différente de la forme des deux autres signaux (correspondant à des niveaux de γ_z plus élevés).

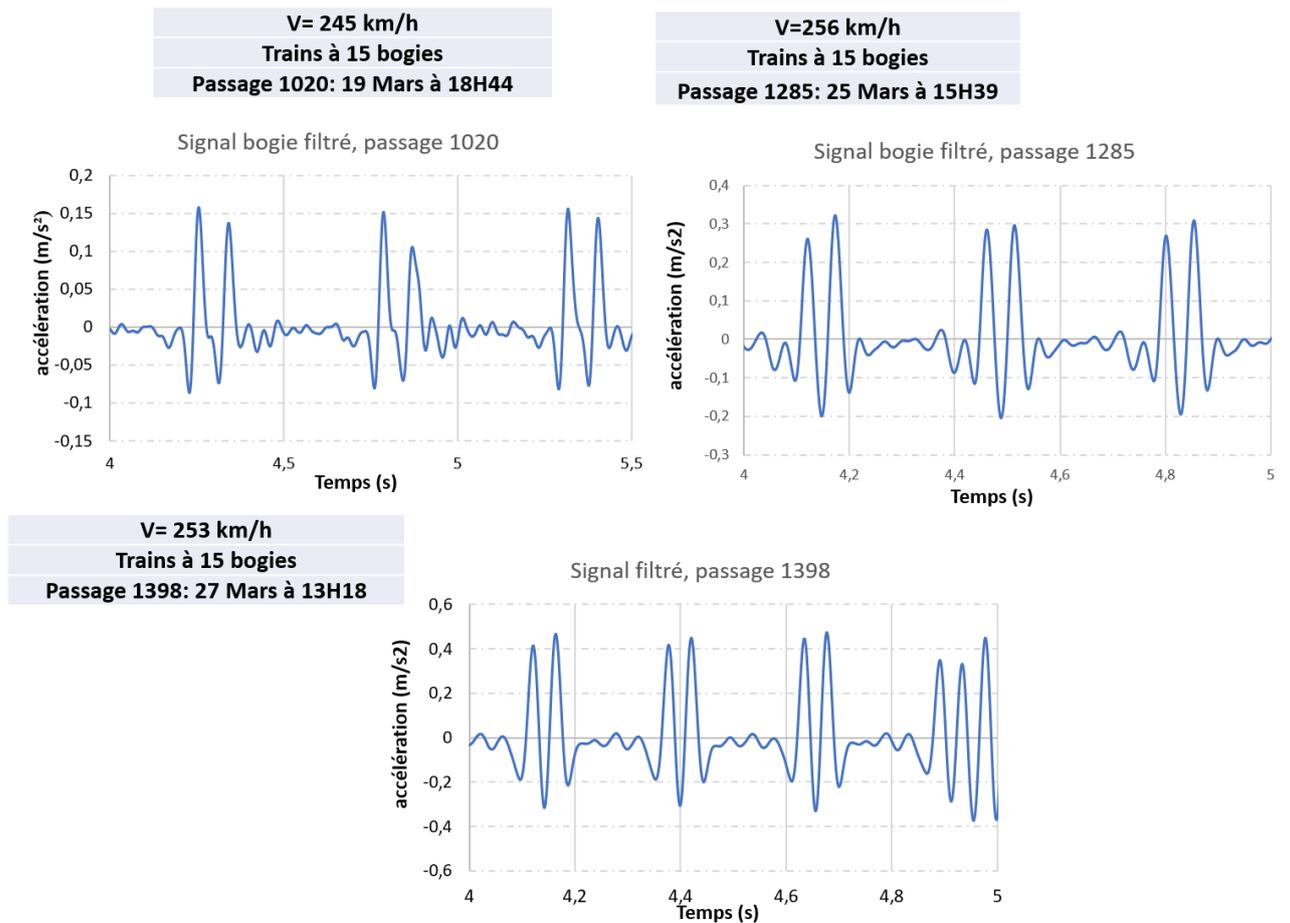


Figure 59 - Signaux d'accélération filtrés d'un bogie de TGV double à 30 bogies passant sur la section 4 en Mars 2018 à une vitesse de 250 m/s (± 5)

La même étude a été réalisée pour les mois d'Avril et de Juin 2018, pour deux passages de TGV à $V= 250 \text{ m.s}^{-1}$ et $V= 300 \text{ m.s}^{-1}$ respectivement, et ayant des valeurs γ_z différentes. Il en résulte les mêmes observations que celles de Février 2018.

Après étude, il est possible d'observer que les valeurs d'accélération sont réparties en deux groupes pour les accélérations négatives, dirigées vers le bas et pour les accélérations positives, dirigées vers le haut. Cette répartition en deux groupes n'est pas liée à la vitesse des trains, ni au nombre des bogies ni au type de traitement. Pour l'instant, aucune explication n'a pu être proposée.