
INFLUENCE DES CIRCULATIONS SUR LE COMPORTEMENT DE LA COUCHE INTERMEDIAIRE

Les chapitres précédents ont permis de mettre en lumière le mode de formation de la couche intermédiaire et son fonctionnement mécanique. Cependant, comme nous l'avons vu dans le chapitre II, la vitesse et les charges influencent le dimensionnement des structures d'assise. Bien qu'il soit techniquement simple, lors de travaux de modernisation, de refaire des structures neuves afin de respecter le dimensionnement prescrit dans le référentiel IN 0260 (SNCF, 1996b), ces travaux se révèlent consommateur en termes de matériaux, de temps, mais également coûteux. A ce jour, en amont des travaux de modernisation tels que les travaux de relèvement de vitesse, il n'est pas possible de déterminer le potentiel mécanique résiduel des couches intermédiaires en place. Afin de pallier ce problème, Lamas-Lopez (2016) étudie l'effet de l'augmentation de la vitesse et de la charge sur le comportement dynamique de la couche intermédiaire. Dans ce chapitre, on présentera une partie de ses résultats issus des essais réalisés sur le site de Vierzon, en relation avec le comportement de la couche intermédiaire face à des trafics réels, puis des résultats d'essais de laboratoire permettant de comprendre l'effet de l'amplification des sollicitations (charge ou vitesse) sur le comportement mécanique du matériau. Enfin, dans la dernière partie de ce chapitre, on abordera comment l'évolution du trafic est prise en compte par la SNCF dans les règles de dimensionnement des structures de voie.

A. La campagne expérimentale in situ

1. Sélection du site d'essai

Comme on le rappelait précédemment, le réseau ferré national comporte environ 30 000 km de ligne classique. Cependant, toutes ne permettent pas d'étudier, de manière exhaustive, le comportement de la couche intermédiaire soumise à des sollicitations ferroviaires, telles que la vitesse et la charge à l'essieu. Ainsi, dans le cadre de ses travaux, Lamas-Lopez a procédé à la sélection d'un site idoine permettant d'appréhender l'effet des circulations sur le comportement de la structure ferroviaire. Pour ce faire, les critères suivants ont été définis pour l'identification de ce site témoin :

- La vitesse de ligne : L'étude du comportement dynamique des structures d'assise implique que le tronçon sélectionné soit circulé par des trains à différentes vitesses. Selon les référentiels SNCF (IC0161, 2015), l'effet dynamique des circulations est pris en compte au-delà

de 160 km/h. Ainsi, pour intégrer cette composante, la voie sélectionnée doit être circulée à des vitesses comprises entre une dizaine de kilomètres heure, jusqu'à 200 km/h,

- La charge à l'essieu : tout comme la vitesse, ce paramètre est également important, car il permet de déterminer l'influence de la charge sur le comportement de la structure. Actuellement, la charge à l'essieu maximale du RFN est de 22,5 t/e. Cependant, les trains circulants sur le réseau ont des charges à l'essieu différentes. Par exemple, nous pouvons citer les 13 t/e pour les trains régionaux, 17,5 t/e pour les TGV, 22,5 t/e pour les trains FRET ou les motrices. Avoir une hétérogénéité de convoi permet donc d'appréhender l'effet de la charge sur le comportement de la couche intermédiaire pour des trains circulant à la même vitesse.

- Le groupe UIC : Cette notion prend en compte le trafic de la ligne ainsi son taux de fréquentation. Dans cette étude, et pour assurer la reproductibilité de celle-ci, il a été décidé de se limiter aux groupes UIC 3 à 5 afin d'avoir un trafic suffisant.

- Tracé de voie : Une voie en alignement est recherchée pour avoir une iso-répartition de la charge des mobiles, évitant ainsi toute amplification due aux courbes.

- Qualité de la voie : Le tronçon sélectionné ne doit pas présenter de défaut de voie et de géométrie. En effet, ces défauts provoquent, au passage des circulations, des efforts dynamiques plus importants qui induiraient des biais dans les mesures. Afin de pallier ce problème, les données de géométrie de la voie ont été analysées, et il a été décidé de ne considérer que les voies récemment renouvelées (moins de 10 ans) pour ne pas subir une dégradation de la voie due à son âge.

- A l'énumération de ces paramètres (Figure V.1), trois sites ont été identifiés sur le RFN : Strasbourg, Angoulême et Vierzon. Suite à la visite du site de Vierzon, celui-ci a été retenu du fait, notamment, de la possibilité de disposer de la voie durant 24h pour procéder à son instrumentation.

-

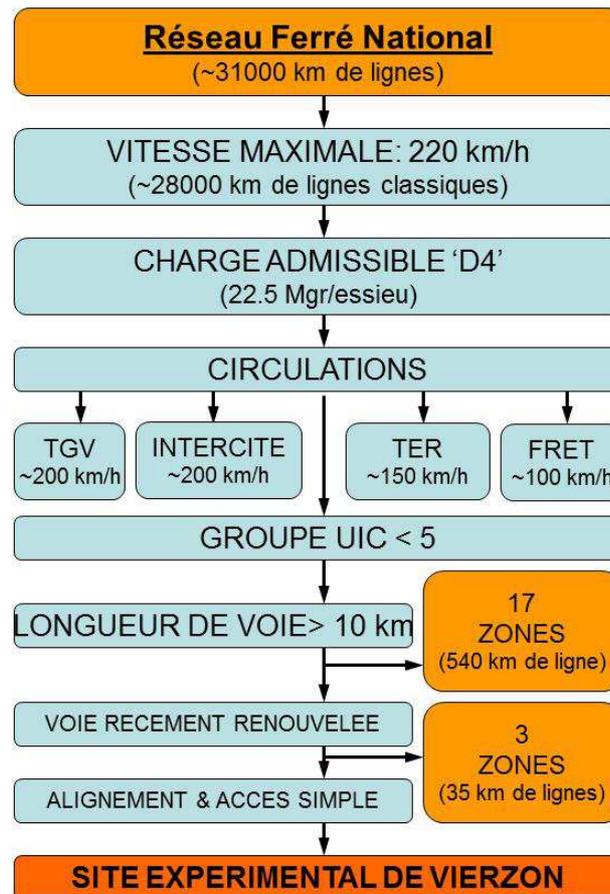


Figure V.1 : Logigramme de sélection du site expérimental (Lamas-Lopez, 2016)

2. Caractérisation du site de Vierzon et mise en œuvre des capteurs

Le site de Vierzon (Figure V.2) retenu est situé au point kilométrique 187+200 de la ligne Les Aubrais – Montauban. Cette ligne est une double voie électrifiée située dans un déblai de 2,5 m de profondeur ce qui, en plus de critères énoncés précédemment, permet de s'assurer de l'absence de matériaux anthropiques entre la couche intermédiaire et le sol support. L'armement est constitué de traverses bi-bloc B450 PI et d'un rail 60-E1 (60kg/m). Un dispositif de drainage est situé de part et d'autre des voies avec un fil d'eau calé d'environ 1,20 m sous la base de ballast.



Figure V.2 : Vue du site expérimental de Vierzon

La caractérisation du site tant d'un point de vue géométrique que géotechnique s'est réalisée en deux phases. La première a consisté en la réalisation d'une campagne de reconnaissance des structures ferroviaire (Lamas-Lopez, 2016) à l'aide de l'outil Panda® endoscope. Cette première étape a permis de déterminer les épaisseurs des matériaux en présence sur chaque des voies, permettant ainsi une implantation précise des capteurs dans la couche intermédiaire, la couche de transition et le sol support. Au total 5 profils, équidistants de 5m, et 6 sondages panda-endoscope ont été réalisés (Figure V.3).

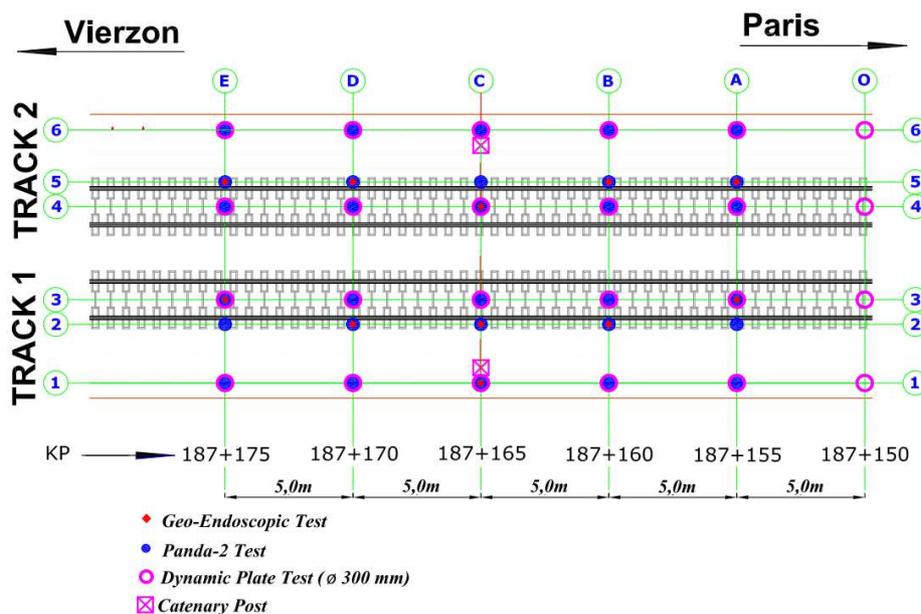


Figure V.3 : Implantation des sondages de reconnaissance du site expérimental de Vierzon (Lamas-Lopez, 2016)

Les informations ainsi obtenues ont permis de déterminer la structure nominale du site. Le premier constat, issu de ces investigations, est que la structure rencontrée en voie 1 ou 2 est similaire en termes d'épaisseur, mettant en évidence l'homogénéité des circulations sur les deux voies. Ainsi, la géométrie de la voie peut être définie : 45 cm de ballast sous traverse, 10 cm de ballast colmaté ; 36 cm de couche intermédiaire et 22 cm de couche de transition surmontant le sol support.

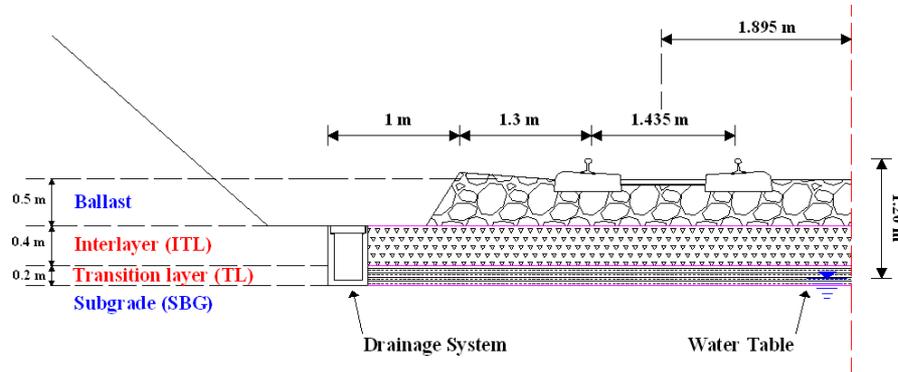


Figure V.4 : Profil en travers du site de Vierzon (Lamas-Lopez, 2015)

La seconde étape a été la caractérisation géologique, et géotechnique et hydraulique de la zone d'essai. La lecture de la carte géologique montre que la voie surmonte un sol sablo-limoneux, ce qui a été confirmé par les sondages géotechniques réalisés lors de l'instrumentation. Les échantillons de matériaux prélevés par carottage ont permis de réaliser la caractérisation des sols en termes de granulométrie et de plasticité (Figure V.5). Cette analyse a également permis de définir la granulométrie du matériau de remplissage des sondages afin que ses paramètres de nature s'apparentent à ceux du sol en place.

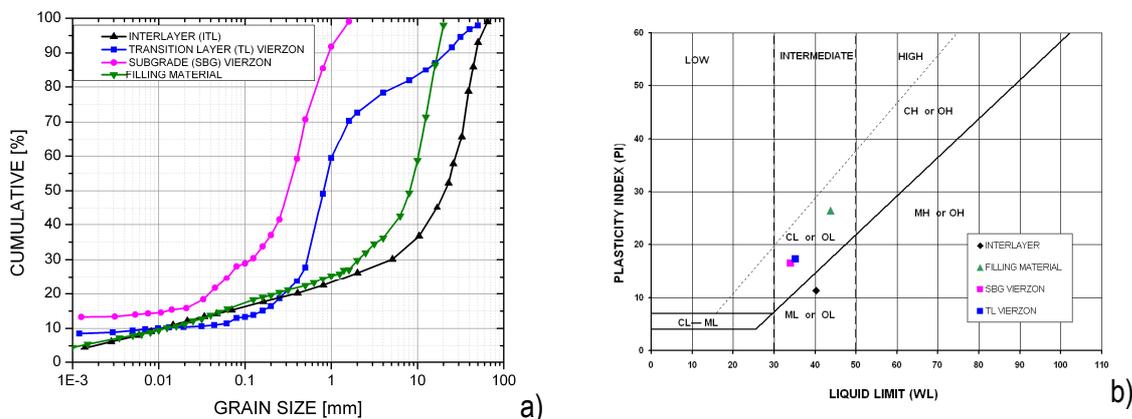


Figure V.5 : Courbe granulométrique (a) et limites d'Atterberg pour les différents sols prélevés sur le site de Vierzon (Lamas-Lopez, 2016)

La Figure V.5a montre la distribution granulométrique des sols prélevés lors des forages. Ce diagramme met en évidence la transition de distribution graduelle des gros éléments depuis la couche intermédiaire jusqu'au sol support. Ainsi, plus on s'approche du sol support, sablo-limoneux, plus le diamètre D_{max} est petit. De même, la courbe de la couche de transition met en évidence une discontinuité entre les diamètres 1 et 10 mm, confirmant ainsi le rôle de séparation rempli par le complexe sol support / couche de transition / couche intermédiaire. Cela confirme le processus de formation, mis en lumière par Trinh (2011), de la couche intermédiaire par interpénétration entre le ballast et le sol support. La plasticité similaire entre le sol support et la partie fine de la couche intermédiaire valide également ce processus de formation (Figure V.5b).

Concernant l'analyse hydraulique du site, celle-ci a révélé la présence d'un assainissement situé de part et d'autre de la voie (coté V1 & V2). La profondeur de celui-ci a été mesurée à une soixantaine de centimètres sous la piste et des barbacanes ont été identifiées en fond de caniveau. Un piézomètre a été installé en piste lors de la campagne d'instrumentation. Celui-ci a mis en évidence la présence d'une nappe phréatique à soixante centimètres sous la piste soit 1,40m sous le plan de roulement.

Afin de déterminer l'influence des circulations sur le comportement hydromécanique de la couche intermédiaire, 42 capteurs ont été mis en œuvre sur ce site expérimental :

- 16 accéléromètres : qui permettant d'analyser l'accélération des particules et d'obtenir par double intégration la valeur de déplacement de celles-ci.
- 3 géophones : qui mesurent la vitesse des particules au passage des circulations. Tout comme les accéléromètres, l'intégration de cette mesure permet d'obtenir le déplacement des particules. Le choix de mettre en place des géophones a été motivé par le fait qu'ils permettent d'obtenir le déplacement en ne procédant qu'à une seule intégration, limitant ainsi la marge d'erreur. Cependant, ces capteurs restent mécaniquement fragiles, c'est pourquoi la SNCF utilise peu ce genre de capteurs.
- 5 capteurs de contrainte : pour étudier la contrainte appliquée à différentes profondeurs lors du passage des circulations. Cette information est intéressante, car elle permet d'appréhender l'effet dynamique induit par le passage des circulations. Certains auteurs (Bian et al., 2014 ; Xu et al., 2013 ; Chen et al., 2013) ont montré que l'amplification de la contrainte pouvait varier de 1,05 à 1,7 en fonction de la nature du sol support, la profondeur, la charge à l'essieu et la vitesse du train.
- 4 sondes de pression interstitielle : permettant d'analyser l'évolution de celle-ci lors du passage des circulations. En effet, comme l'a montré Duong (2013), l'eau contenue dans le sol,

si elle ne peut se dissiper, va diminuer la contrainte effective pouvant amener à la liquéfaction du sol et donc à la remontée des particules fines à la surface.

- 12 jauges de déformation : ayant le triple rôle de mesurer la charge à l’essieu des trains circulant, la distance entre essieu (permettant de caractériser le train), mais également le démarrage de l’enregistrement de la centrale d’acquisition des capteurs.
- 2 capteurs LVTD : mesurant l’enfoncement de la traverse au passage des circulations et permettant de valider la double intégration appliquée aux accéléromètres.

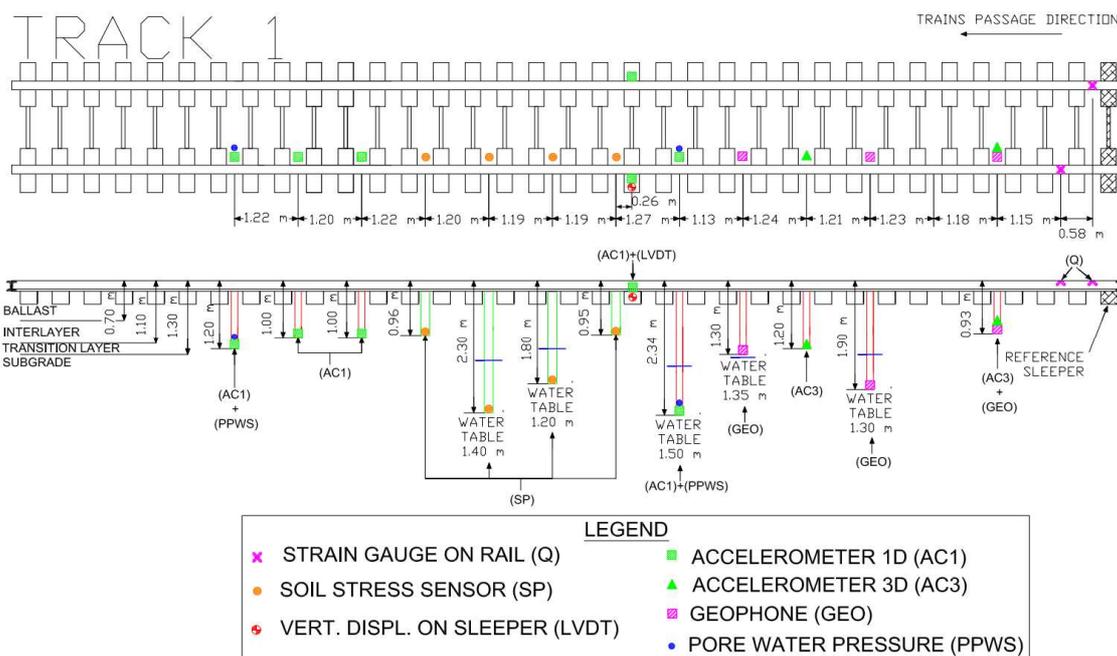


Figure V.6 : Implantation des capteurs sur le site de Vierzon en V1 (Lamas-Lopez, 2016)

Sur ces 42 capteurs, 24 ont été implantées sur la voie 1 (sens Orléans –Montauban - Figure V.6) sur un linéaire de 21 m. Cinq profondeurs ont été considérées permettant ainsi d’analyser la diffusion des efforts dans la profondeur : niveau de la traverse ($z = 0$ m) ; couche intermédiaire ($z = -0,90$ m) ; Couche de transition ($-1,20$ m) ; sol support 1 ($-1,80$ m) et sol support 2 ($-2,30$ m). Concernant la voie 2, seulement 9 capteurs ont été mis en œuvre afin d’étudier d’éventuelle propagation des ondes transversale. Le reste des capteurs (LVDT, jauges) sont disposés en surface.

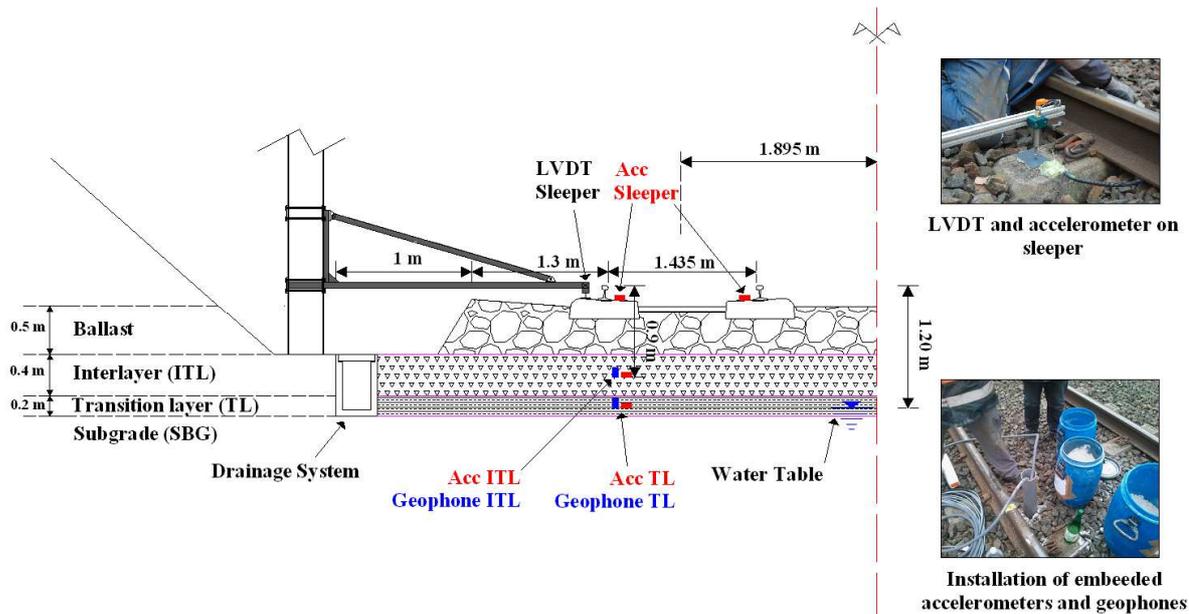


Figure V.7 : Profil en travers de l'implantation des capteurs en V1 (Lamas-Lopez 2015)

3. Influence des circulations sur le comportement de la couche intermédiaire

L'instrumentation mise en œuvre sur le site de Vierzon permet de réaliser une acquisition de l'ensemble des trains circulant sur ce tronçon, permettant d'analyser le comportement de la couche intermédiaire face à différents types de sollicitations telles que la charge à l'essieu et la vitesse. La Figure V.8 présente l'ensemble des circulations ayant emprunté le site expérimental dans la période d'avril à août 2014. Au total, 8 135 trains ont circulé sur cet axe dont 1 790 Intercités (point rouges) qui sont constituées, en fonction de leur composition, de 32 essieux (motrice + 7 voitures) ou 60 essieux lorsque le train est allongé (motrice + 14 voitures). La vitesse de circulation de ces convois est majoritairement de 200 km/h, et est inférieure lorsque le train dépasse les 60 essieux. Concernant les autres convois, on peut identifier : les trains FRET, longs (> 100 essieux) et dont la vitesse maximale se situe aux environs des 140 km/h ; les trains régionaux de faible longueur (< 20 essieux) et dont la vitesse nominale est celle de la ligne, 200 km/h. Enfin, les points bleus masqués par les intercitys correspondent aux TGV roulant sur l'axe Orléans-Montauban.

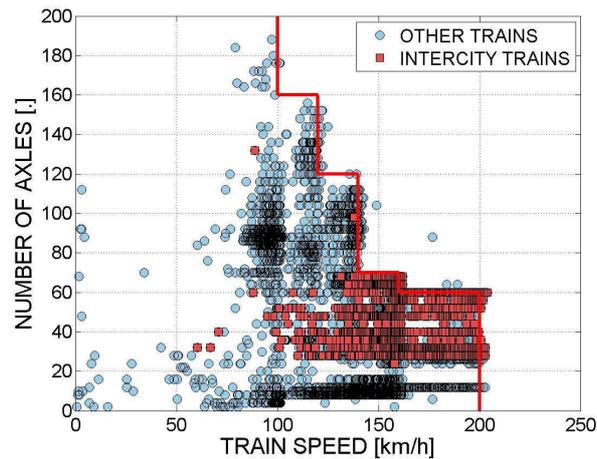


Figure V.8: Ensemble des trains ayant circulé sur le site expérimental de Vierzon d'avril à août 2014.

Classification nombre d'essieu / vitesse du train (Lamas-Lopez, 2016)

Lors de la sélection du site d'instrumentation, nous avons identifié que la multitude des trains circulant sur la voie, pouvaient rendre l'analyse, pour un même train circulant à des vitesses différentes, compliquée. Afin de regarder l'effet de la vitesse sur le comportement dynamique de la structure d'assise, nous avons fait circuler un train d'essai de l'Agence d'Essai Ferroviaire sur la zone (Figure V.9).



Figure V.9 : Train d'essai de l'AEF sur le site de Vierzon

Ce type de train intercity composé d'une motrice et de 7 voitures passagers (Figure V.10) a été utilisé dans le but d'analyser la sollicitation dynamique des trains sur la couche intermédiaire.

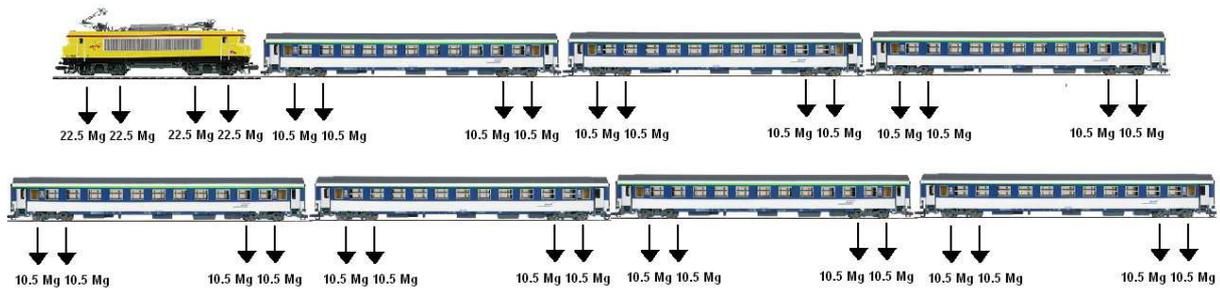


Figure V.10 : Détail du convoi AEF utilisé pour l'essai in situ (Lamas-Lopez, 2016)

La motrice est une BB 22399 (2 essieux par boggie) d'une masse totale de 90 tonnes, longue de 17,8 m ; elle est supportée par deux boggies distants de 9,8 m et dont les roues qui le compose sont espacées de 2,8 m. Les voitures corail sont longues de 26,4 m pour une masse totale de 42 tonnes. La distance des bogies est de 18,4 m et celle des essieux est de 2,8 m.

L'objectif de ces essais est d'étudier le comportement du sol soumis à une excitation différente. La vitesse de circulation du train s'échelonne de 60 à 200 km/h (60, 100, 140, 160, 180 et 200 km/h) afin d'étudier le comportement quasi statique et dynamique des circulations. L'effet des sollicitations est étudié en analysant le déplacement du matériau de la couche intermédiaire et sol support, ainsi que la contrainte appliquée dans les différents éléments de sol.

a. Effet de la vitesse sur la déformation du matériau

Le déplacement du matériau est étudié en analysant le comportement des accéléromètres présents dans le sol. Lamas-Lopez (Lamas-Lopez., 2016) a mis en évidence que les longueurs d'onde équivalentes à la distance entre essieux causent plus de 95% de sollicitations infligées au matériau. Dans le cadre de cette analyse, il a appliqué un filtre passe-bas de 25 Hz correspondant à l'excitation infligée par un essieu circulant à 200 km/h. Les longueurs d'onde supérieure causant principalement une dégradation au niveau de l'armement. Quant au filtre passe-haut, celui-ci est pris à 1,5 Hz pour éviter tout problème lié aux artéfacts de mesure.

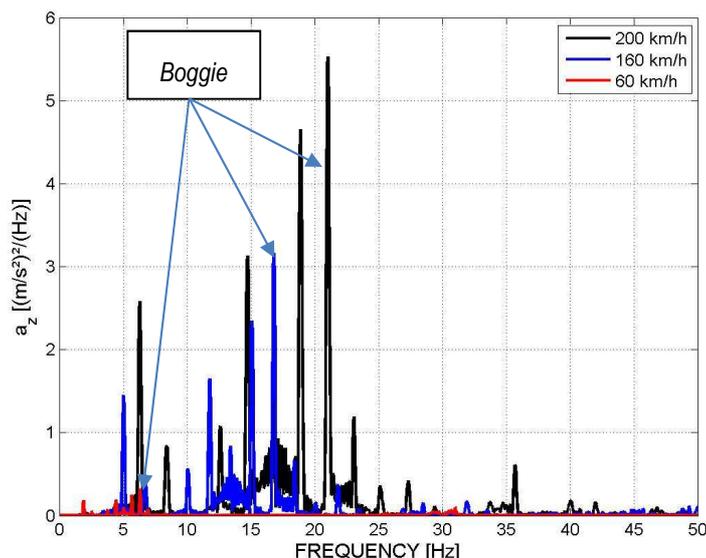


Figure V.11 : Spectre de densité de puissance du signal accélérométrique (non traité) dans la couche intermédiaire (-0,9m). Enregistrements du capteur à trois vitesses différentes (Lamas-Lopez, 2015)

La Figure V.11 présente le spectre de densité de puissance issu d'un accéléromètre présent dans la couche intermédiaire. Ce graphique met en évidence l'effet de la vitesse sur les gammes d'excitation de la structure d'assise.

A partir de l'analyse d'un signal d'accéléromètre, il est possible de tirer deux enseignements principaux. Le premier est que la charge à l'essieu influence l'amplitude d'accélération du signal. Ainsi, pour la motrice (22,5 t/e), l'amplitude de ce signal est d'environ 3 m/s², tandis qu'elle est de 1,5 m/s² pour les voitures corail (10,5 t/e). Un facteur deux est noté entre les accélérations dues à la motrice et celles des voitures passagers. Ce facteur est à mettre en relation avec la différence de masse de ces deux mobiles qui est là aussi près du double. Le second enseignement est l'atténuation du signal avec la profondeur. La Figure V.12 met clairement en avant l'énergie absorbée dans la couche intermédiaire et ce qui est transmis à la couche de transition. Ainsi, on remarque que l'intensité du signal, et par conséquent l'énergie de sollicitation, diminuent d'un facteur deux entre 0,90 m (ITL) et 1,20 m (TL). La dissipation d'énergie entre la couche de transition et le sol support est également de deux.

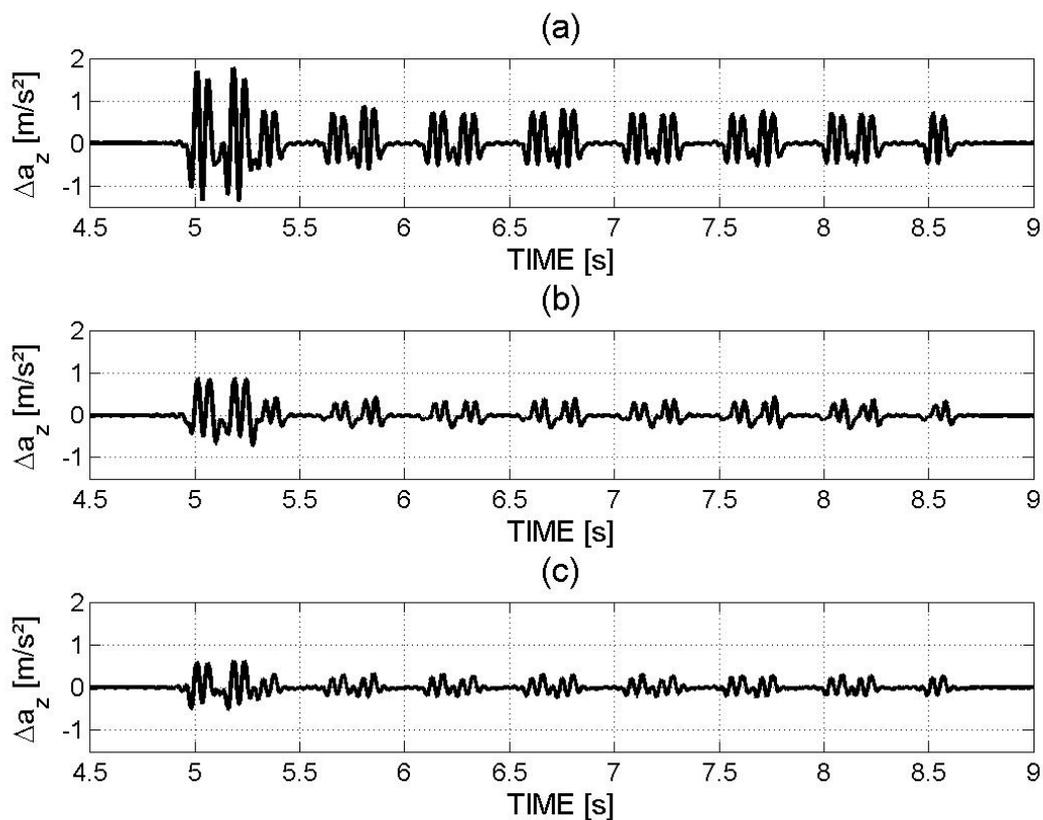


Figure V.12 : Accélération verticale au niveau de la couche intermédiaire (a), de la couche de transition (b) et du sol support (c) pour un Intercité circulant à 200 km/h (Lamas-Lopez, 2016)

La Figure V.13 présente l'influence de la vitesse sur les amplitudes d'accélération de la particule de sol. Ce graphique confirme, pour une même profondeur, l'influence de la vitesse sur l'amplitude d'accélération de la particule. De plus, on remarque que pour une sollicitation quasi statique (60 km/h), l'accélération est quasiment la même (0,1 m/s) et ce quel que soit la profondeur du capteur et la charge à l'essieu du mobile. Cependant, cette tendance n'est plus vérifiée dès lors que le train circule à une vitesse de 140 km/h, pour laquelle on observe une divergence des mesures en fonction de la profondeur. Cette vitesse de 140 km/h peut être considérée comme étant un seuil au-delà duquel, les amplitudes d'accélération augmentent de façon importante avec la vitesse pour les capteurs situés en surface. Ainsi à 200 km/h, la valeur d'accélération mesurée dans la couche intermédiaire est de 1,6 m/s² au passage de la motrice et de 0,7 m/s² pour les voitures voyageurs, valeur à mettre en parallèle à la valeur quasi statique proche de 0,1 m/s. Quant aux capteurs placés en profondeur (sol support), l'augmentation de l'amplitude d'accélération est moins prononcée, cependant elle reste sensible à la charge à l'essieu sollicitant.

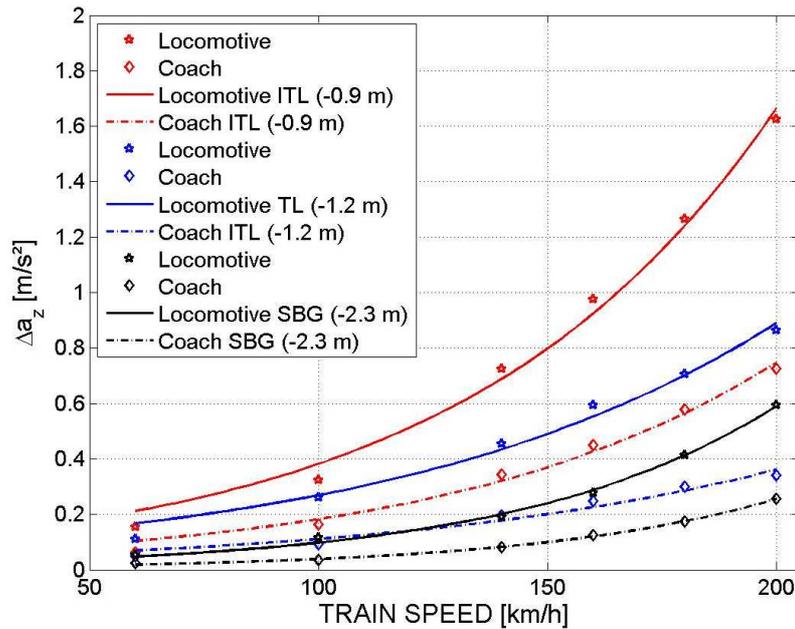


Figure V.13: Evolution du signal d'accélération maximale en fonction de la vitesse du train et de la profondeur du capteur (Lamas-Lopez, 2016)

L'analyse d'un signal d'accéléromètre permet d'appréhender l'accélération d'une particule de sol à une profondeur donnée. Si l'on double intègre cette valeur (Lamas-Lopez, 2016), on obtient le déplacement de cette même particule dans le massif de sol (Figure V.14).

Ainsi, on constate qu'à partir de 100 km/h, on obtient une amplification de l'accélération mettant en évidence la transition entre le comportement quasi statique obtenu à 60 km/h et les vitesses au-delà. L'effet de la masse sur le déplacement de la particule du sol est également mis en avant. Cependant, les charges légères sont faiblement transmises au niveau de la couche de transition, mettant ainsi en avant l'effet de la dissipation de la charge au niveau du sol support.

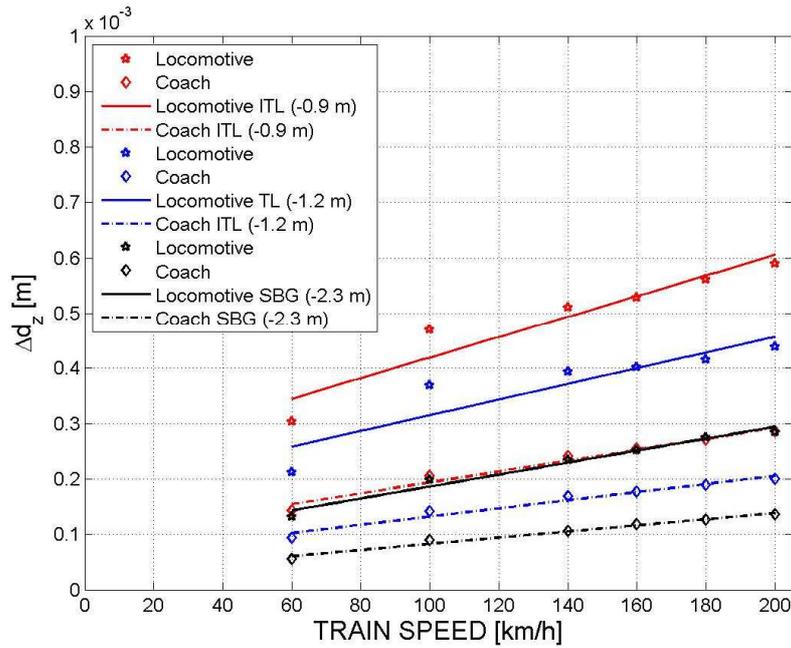


Figure V.14 : Evolution des déplacements verticaux en fonction de la masse à l'essieu, de la vitesse du train et de la profondeur du capteur (Lamas-Lopez, 2016)

Cette information est essentielle, car elle permet d'étudier la déformation d'une couche de sol face à une circulation. En effet, si l'on part du postulat que la sollicitation ferroviaire est homogène tout au long de la zone d'essai et que les capteurs mis en œuvre ont été positionnés de la même façon quel que soit le forage, il est alors possible de calculer la déformation de la couche en faisant translater les accéléromètres pour les superposer. La déformation est alors déduite par l'Équation V-1 :

$$\Delta \varepsilon_z = \frac{(u_2 - u_1) \times 100}{d}$$

Équation V-1

où u_i est le déplacement de l'accéléromètre à la position i et d est la distance entre ces deux capteurs. Quant au signal même de l'accéléromètre, celui-ci est translaté à l'aide de la formule suivante qui permet d'obtenir la même temporalité d'analyse de la sollicitation :

$$pos_{1-2} = dist_{1-2} \times f_s \times v_T$$

Équation V-2

avec $dist_{1-2}$ la distance entre les accéléromètres, f_s la fréquence d'acquisition, et v_T la vitesse du train.

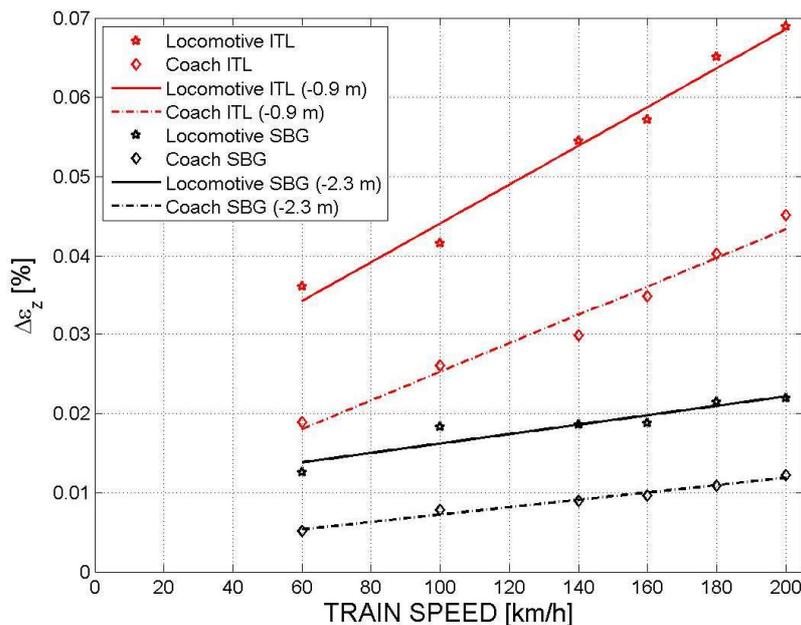


Figure V.15: Déformation maximale de la couche de sol en fonction de la masse du mobile et de la vitesse (Lamas-Lopez, 2016)

La Figure V.15 présente la déformation calculée dans la couche intermédiaire (-0,9 / 1,2 m) et dans le sol support (1,2 / 2,3m). Ce graphique montre une amplitude de déformation plus importante dans la couche intermédiaire (0,06%) que dans le sol support (0,02%). Cela montre bien la capacité de la structure d'assise à absorber les déformations afin de diminuer les sollicitations appliquées au sol support. Concernant l'effet de la vitesse et de la charge sur la déformation du sol, le Figure V.15 met en évidence l'effet de ces sollicitations sur le comportement du sol. Ainsi, à l'inverse de l'accélération, la charge quasi statique joue un rôle sur la déformation de la couche sous-jacente. Comme nous l'avons vu précédemment, l'augmentation de la vitesse a une influence plus importante sur la couche structurante (couche intermédiaire) qu'en profondeur. Cette figure met également en lumière le rôle de la couche de transition qui, de par sa constitution, joue également un rôle mécanique non négligeable et assure la stabilité de la voie. Enfin, la déformation est proportionnelle à la masse de l'essieu.

b. Effet de la vitesse sur la contrainte appliquée au sol

Dans le cadre des essais organisés avec le train d'essai, la réponse des capteurs de contrainte a également été étudiée pour connaître l'influence de la vitesse sur la contrainte appliquée au sein des différentes couches. La Figure V.16 présente l'évolution de la contrainte au passage des circulations, et ce en fonction de la profondeur du capteur. Comme pour la déformation du sol, on constate là aussi une

proportionnalité entre la charge à l'essieu et la contrainte appliquée à la couche. Ce diagramme met en évidence l'impact négligeable, en profondeur (2,30 m), de la vitesse. A l'inverse, on observe en surface une augmentation de la contrainte en fonction de la vitesse. Cela met en avant l'effet de la sollicitation dynamique des circulations sur le comportement du sol et donc sur l'augmentation de la contrainte appliquée à celui-ci.

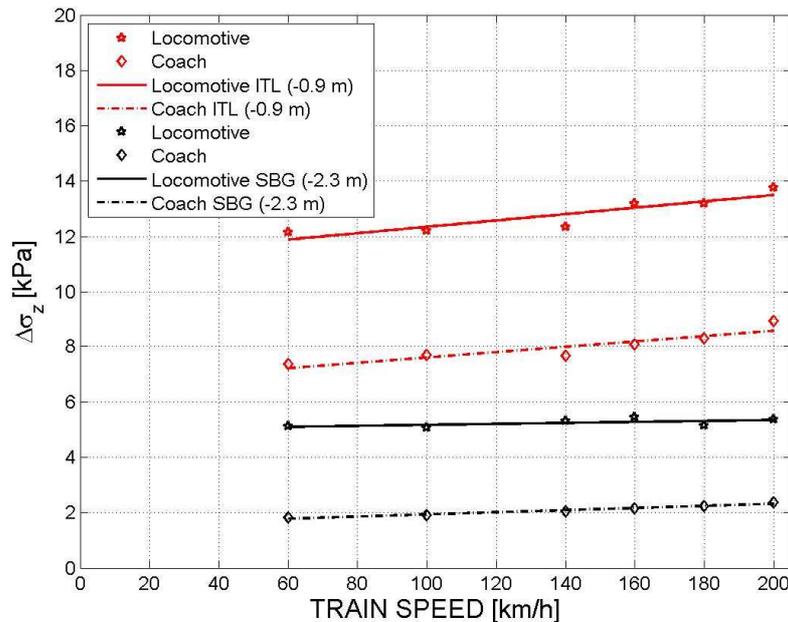


Figure V.16 : Contrainte maximale mesurée en fonction de la vitesse et de la masse du mobile (Lamas-Lopez, 2016)

La Figure V.17 normalise l'effet de l'amplification dynamique de la charge par rapport à la vitesse donnée par le ratio suivant : $\sigma_{zV/t} / \sigma_{z60}$. On constate que l'amplification dynamique est fonction de la masse du mobile et que celle-ci est identique, quelle que soit la position du capteur (couche intermédiaire ou sol support). Ainsi, pour une locomotive de 22,5 t/e, l'amplification dynamique entre une circulation à 60 km/h et 200 km/h est de 20%. Concernant l'amplification imposée par une voiture passager, celle-ci est de 10%.

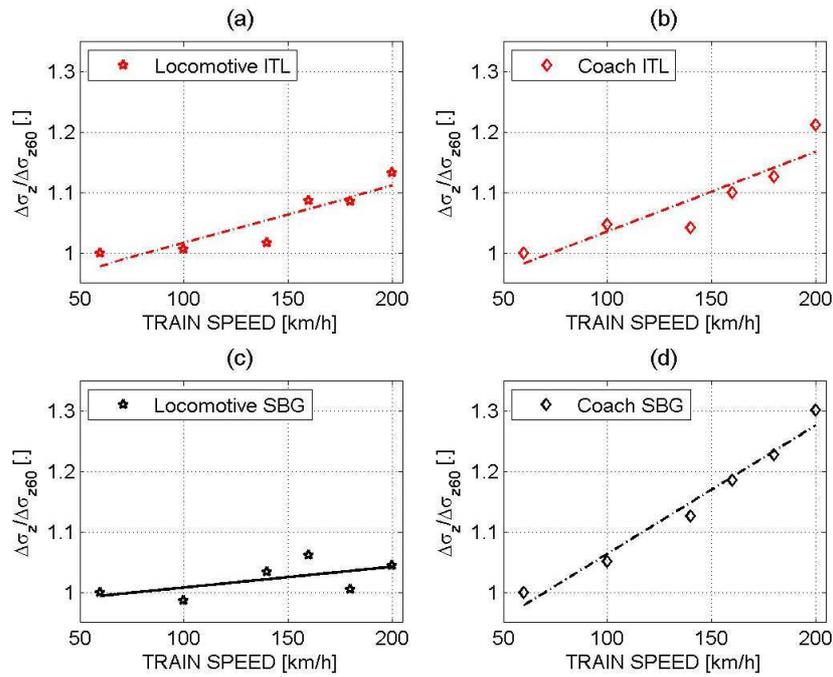


Figure V.17 : Amplification dynamique de la contrainte en fonction de la vitesse et de la masse du mobile (Lamas-Lopez, 2016)

c. Impact de la vitesse sur le module réversible du sol

L'analyse du comportement du sol en contrainte/déformation permet de définir le module réversible d'une couche à partir de l'analyse des boucles d'hystérésis induites par les circulations (Figure V.18).

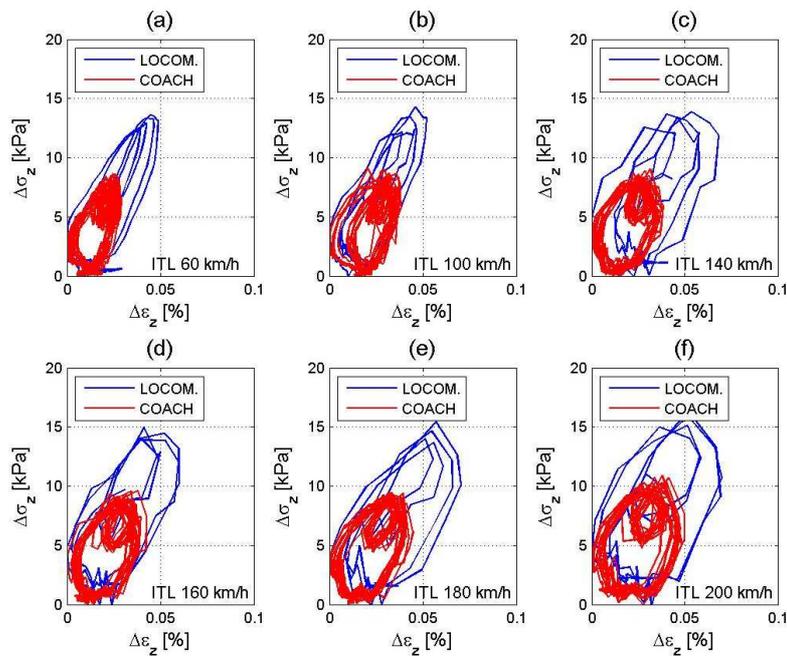


Figure V.18 : Comportement de la couche en contrainte déformation à différentes vitesses (Lamas-Lopez, 2016)

Ce module permet de caractériser le comportement mécanique du sol soumis à un chargement dynamique. Il définit, après relâchement de la contrainte appliquée, la déformation réversible ε_r (récupérée) et la déformation plastique ε_p qui s'accumule dans le matériau et dégrade sa résistance aux sollicitations. Le M_r est obtenu à l'aide de la relation suivante : $M_r = \sigma_q / \varepsilon_r$

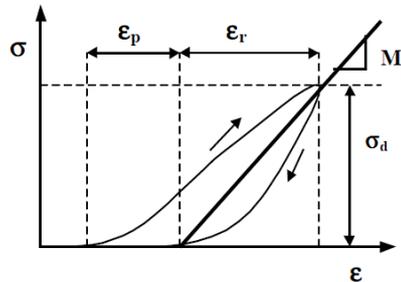


Figure V.19 : Définition du module réversible (M_r)

L'analyse du comportement cyclique du matériau permet également d'estimer le coefficient d'amortissement de celui-ci. Cette valeur indique la capacité du matériau à dissiper de l'énergie. Ce coefficient D_r peut être estimé par l'Équation V-3 :

$$D_r = \left(\frac{E_{boucle}}{4 \times \pi \times E_d} \right)$$

Équation V-3

L'énergie transférée au système E_{boucle} correspond à la surface de la boucle d'hystérésis tandis que E_d définit l'énergie dissipée dans le système ; elle est déterminée par la relation suivante (Équation V-4) :

$$E_d = \left(\frac{\max \Delta q \times \Delta \varepsilon_{\max} \Delta a}{2} \right)$$

Équation V-4

La Figure V.20 montre l'effet du train d'essai circulant à différentes vitesses sur le M_r et le coefficient d'amortissement du sol.

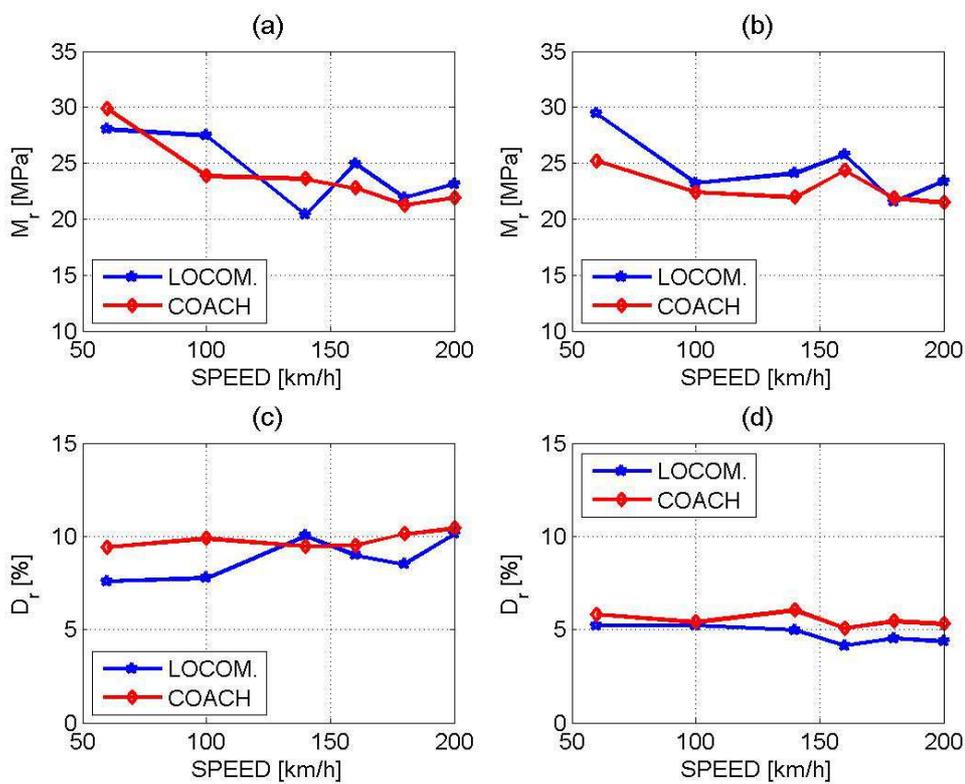


Figure V.20 : Evolution du M_r et du D_r en fonction de la vitesse et de la charge du mobile, pour la couche intermédiaire (a, c) et le sol support (b, d) (Lamas-Lopez, 2016)

Ce schéma met en avant la décroissance du M_r lorsque la vitesse des circulations augmente, qui est évaluée à environ 15%. Cependant, on constate que la masse de la voiture n'a que peu d'impact sur le comportement mécanique du sol, dès lors que le train roule à une vitesse supérieure à 100 km/h. Ce diagramme met également en avant le fait que le comportement mécanique du sol support est de la couche intermédiaire est sensiblement le même.

Si l'on regarde le coefficient d'amortissement du sol, on s'aperçoit que la valeur est la même, quelle que soit la vitesse du train ; mais qu'elle évolue en fonction de la masse à l'essieu de celui-ci. Un autre point important à noter est la différence des résultats obtenus dans la couche intermédiaire et dans le sol support qui est d'un ordre 2. Cela peut en partie être expliqué par la nature même de ces sols. En effet, la couche intermédiaire est un matériau constitué de gros grains qui permettent de mieux emmagasiner la sollicitation et par conséquent sa capacité à dissiper l'énergie. A l'inverse, le sol support est majoritairement constitué de fines particules qui ne peuvent pas jouer ce rôle.

d. Analyse de la réponse du sol face aux circulations commerciale

Après avoir analysé la réponse de la structure ferroviaire vis-à-vis d'une circulation de référence matérialisée par le train d'essai de l'AEF, il est nécessaire d'étudier la réponse des capteurs pour voir si les constats faits précédemment peuvent être généralisés. Pour ce faire, Lamas-Lopez a analysé 1 790 trains intercity, conformément à celui de l'AEF, circulant à des vitesses comprises entre 60 et 200 km/h pendant cinq mois.

Si l'on regarde réponse des accéléromètres (Figure V.21), on constate que l'accélération obtenue est identique à celle obtenue lors de la campagne d'essai (Figure V.13).

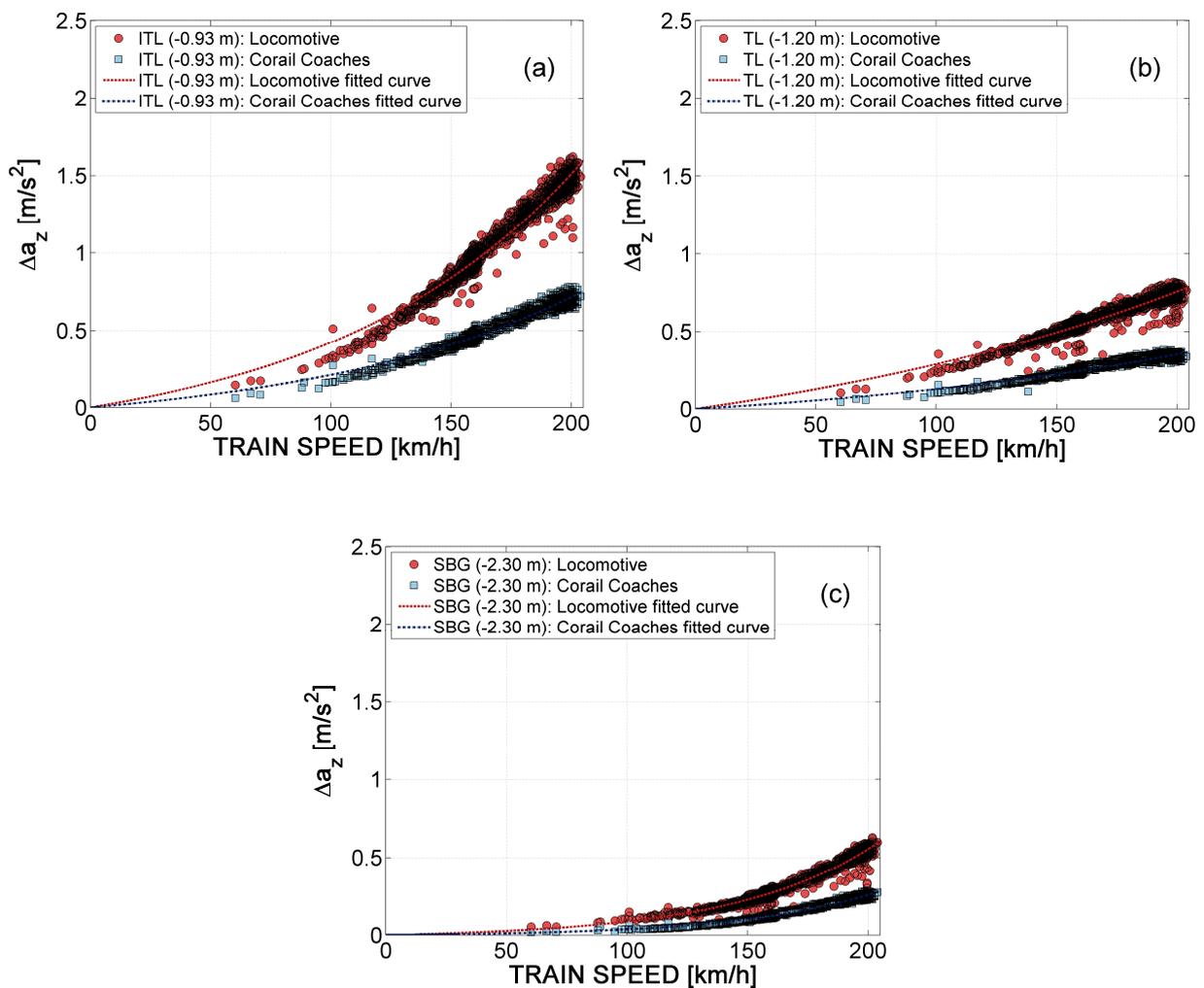


Figure V.21 : Amplitude maximale des accélérations induites par les essieux des locomotives et des wagons : a) couche intermédiaire ; b) couche de transition ; c) sol (Lamas-Lopez, 2016)

Concernant le déplacement des particules de sol (Figure V.22), le constat est également le même, à savoir une augmentation des déplacements avec la vitesse (Figure V.14). Il est à noter toutefois que quelques mesures, obtenues pour des trains circulant à grande vitesse, sont plus élevées que la majorité des valeurs enregistrées. Cela peut s'expliquer par le fait que lorsque les roues ont des défauts de circularité, l'augmentation de vitesse accroît leur effet en provoquant un effort dynamique plus important et par conséquent une déformation supérieure à la normale.

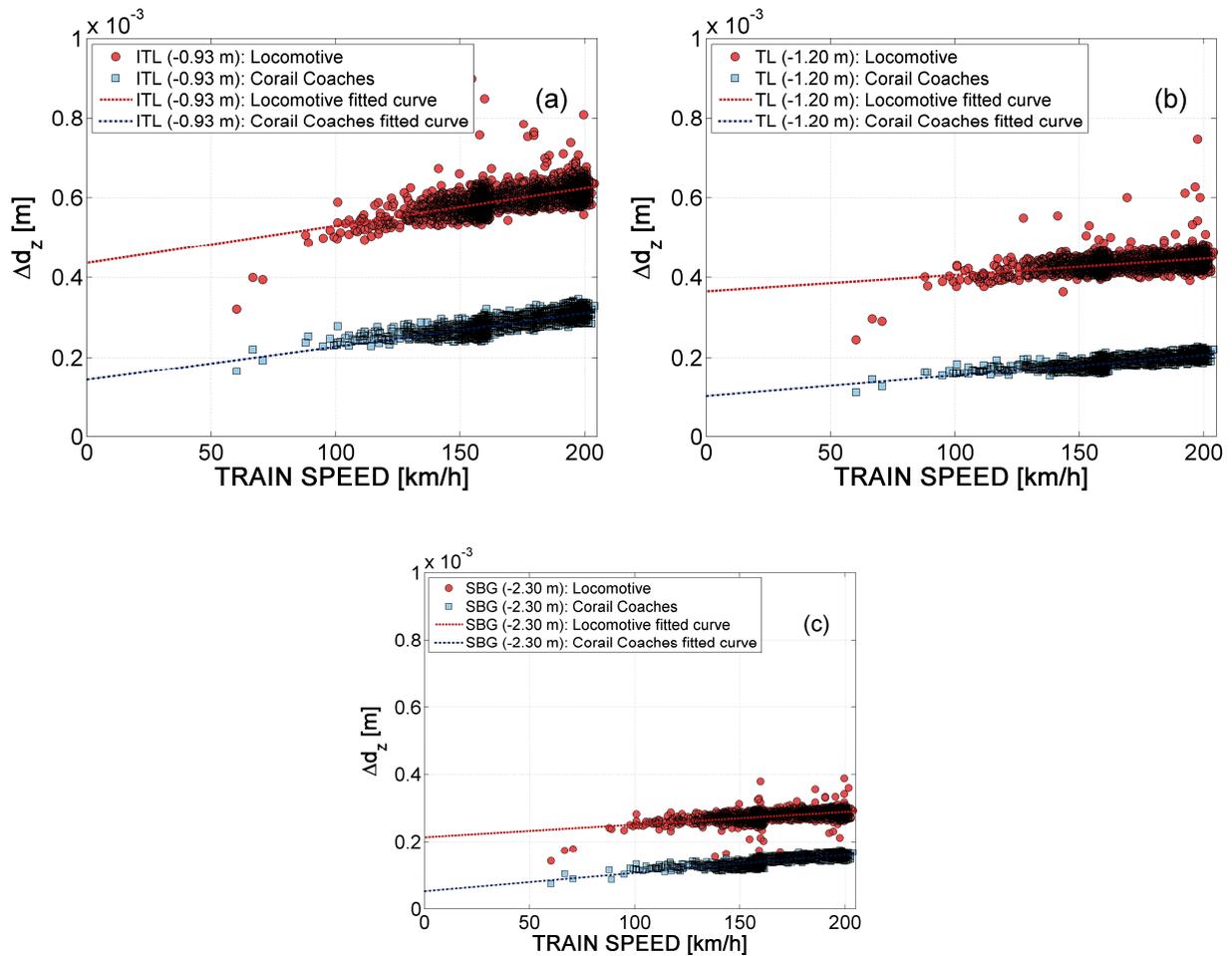


Figure V.22 : Amplitude maximale des accélérations induites par les essieux des locomotives et des wagons : a) couche intermédiaire ; b) couche de transition ; c) sol (Lamas-Lopez, 2016)

Enfin, les valeurs de déformation obtenues (Figure V.23) sont également identiques à celle relevée lors du passage du train d'essai (Figure V.15).

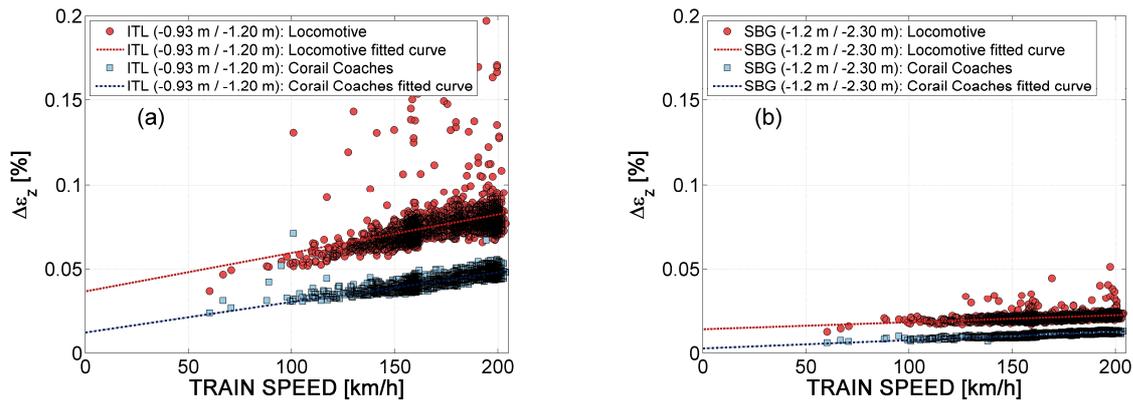


Figure V.23 : Amplitude de déformation induite par l'essieu d'une locomotive ou d'un wagon :

a) couche intermédiaire ; b) sol (Lamas-Lopez, 2016)

La réponse des capteurs de pression (Figure V.24) est conforme à celle obtenue lors des tests réalisés par l'AEF. Là encore comme pour les mesures de déplacement, on observe quelques hétérogénéités dans les valeurs pour les vitesses comprises entre 160 et 200 km/h. Il s'agit probablement des mêmes engins ; ces écarts de mesure sont imputables à des défauts de contact entre le rail et la roue engendrant des efforts dynamiques supplémentaires.

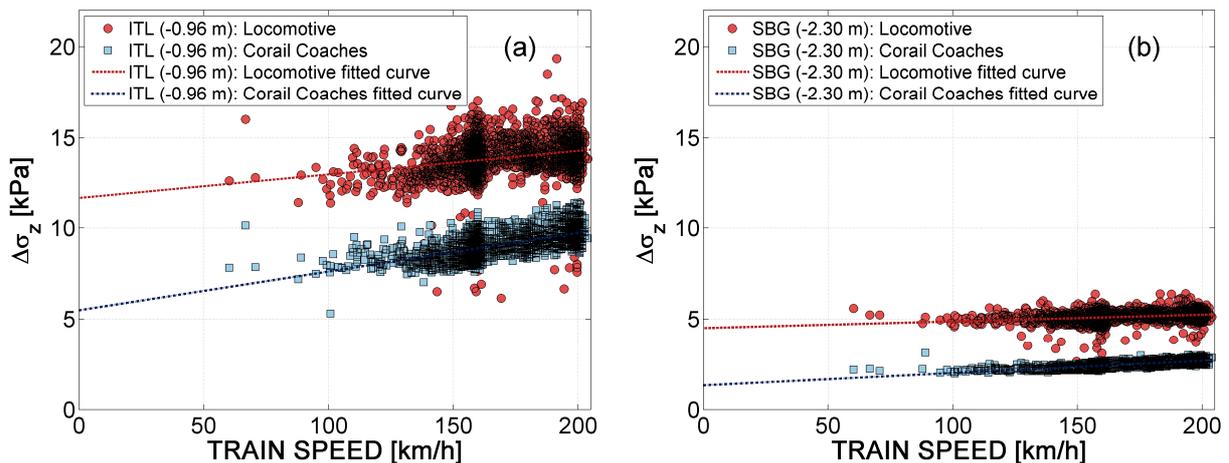


Figure V.24 : Amplitude de contrainte induite par l'essieu d'une locomotive ou d'un wagon :

a) couche intermédiaire ; b) sol (Lamas-Lopez, 2016)

Enfin les analyses permettant de déterminer le M_R du sol, mettent en évidence, comme lors des essais de l'AEF, que le module décroît avec la vitesse. Cependant, on constate un effet plus marqué de la profondeur sur l'atténuation de l'effet de la vitesse dans l'évolution du M_R .

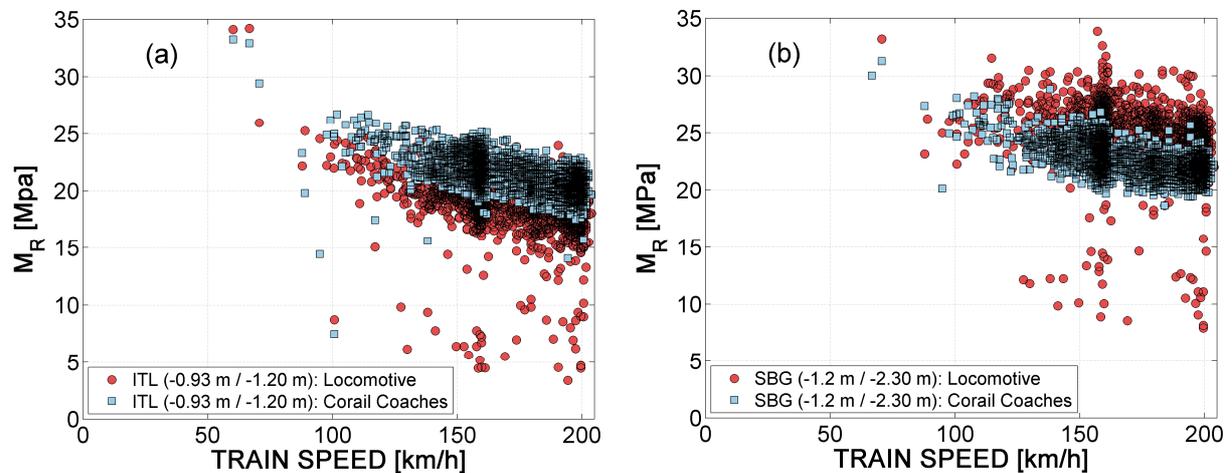


Figure V.25 : Estimation du module réversible induit par l'essieu d'une locomotive ou d'un wagon :
a) couche intermédiaire ; b) sol (Lamas-Lopez, 2016)

e. Conclusion

La similitude des résultats obtenus lors de l'acquisition en continu sur les trains commerciaux et ceux obtenus avec le train d'essai de l'AEF met en avant la fiabilité du dispositif de mesure mis en œuvre. Celui-ci a permis de mettre en évidence l'influence de la vitesse et de la charge sur l'évolution des paramètres, tels que la déformation, la contrainte et le M_R . On constate également une augmentation de l'ensemble de ces valeurs lorsque le train circule à une vitesse supérieure ou égale à 160 km/h. Cette information est intéressante, car à mettre en relation avec les référentiels SNCF (IN 0260) actuels qui demande de prendre en compte dès 160 km/h l'effet dynamique des circulations. Cette prise en compte implique la mise en œuvre d'une épaisseur plus importante de structure d'assise. Cependant, le comportement intrinsèque de la couche intermédiaire dépend de sa capacité à accepter la charge tout en retrouvant son niveau de déformation initial (ϵ_r). Par ailleurs, l'effet de la vitesse sur le coefficient d'amortissement est intéressant. En effet, l'on constate que celui-ci est principalement dépendant de la charge à l'essieu et non de la vitesse.

L'ensemble de cette analyse a permis d'étudier le comportement de la couche intermédiaire dans son environnement et soumise à de chargements réels. Pour mieux appréhender le comportement même de ce matériau, il est nécessaire de procéder à des modifications de ses paramètres d'état. Ainsi, il a été réalisé des essais de laboratoire afin d'étudier le comportement hydromécanique de la

couche intermédiaire en environnement maîtrisé (laboratoire). C'est l'objet de la prochaine partie de ce chapitre.

B. Essais de laboratoire : prise en compte de l'amplification de sollicitation

Comme on vient de le voir, le comportement mécanique de la couche intermédiaire dépend de la teneur en eau du sol sur lequel circulent les trains. Au cours de leurs travaux, Trinh (2011) et Duong (2014) ont mis en avance l'effet négatif de l'eau sur le comportement de la couche intermédiaire. Lamas-Lopez a ainsi prolongé l'étude du comportement dynamique en laboratoire à l'aide d'essais triaxiaux. Pour ce faire, il a reconstitué un sol modèle correspondant à celui prélevé sur le site de Sénissiat dans le cadre des travaux de Trinh (2011 ; Figure V.26). Lamas-Lopez a constitué deux éprouvettes à différentes teneurs en eau. La première est à la teneur en eau de l'optimum proctor ($\rho_d = 2.2 \text{ Mg/m}^3$), soit 4,3%, et la seconde correspond à la teneur en eau à la saturation, soit 10%.

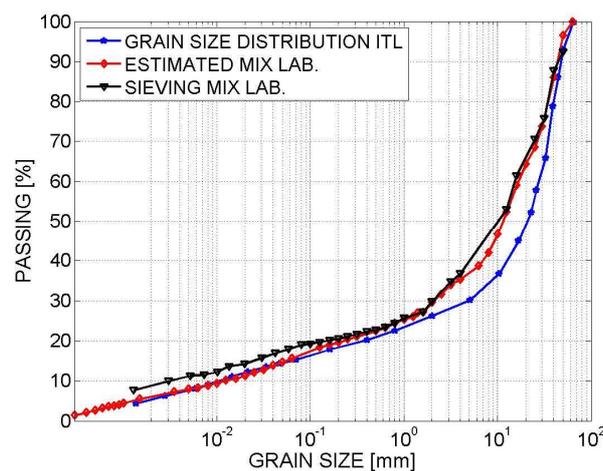


Figure V.26 : courbe granulométrique de la couche intermédiaire reconstituée. Comparaison avec la couche intermédiaire du site de Sénissiat (Lamas-Lopez, 2016)

Chaque échantillon a été sollicité par un niveau de chargement correspondant à celui appliqué au niveau de la couche intermédiaire à savoir de $\Delta q = 10 \text{ kPa}$ à $\Delta q = 30 \text{ kPa}$ (avec un incrément de charge de 5 kPa ; Figure V.27).

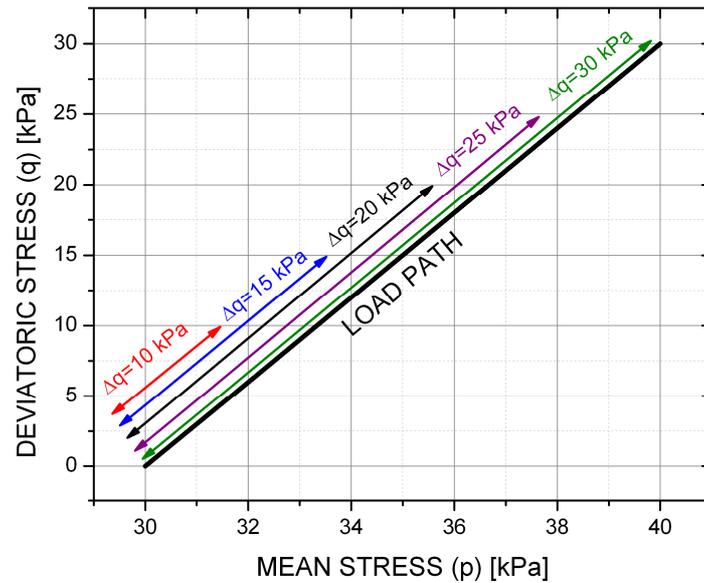


Figure V.27 : Chemin de chargement ($q-p$) des éprouvettes (Lamas-Lopez, 2016)

L'effet de la vitesse a été pris en compte en simulant trois vitesses de train (100, 160 et 200 km/h ; Figure V.28). L'objectif de ces essais est d'analyser le comportement hydromécanique de la couche intermédiaire sous les effets de la fréquence et de l'amplitude de chargement.

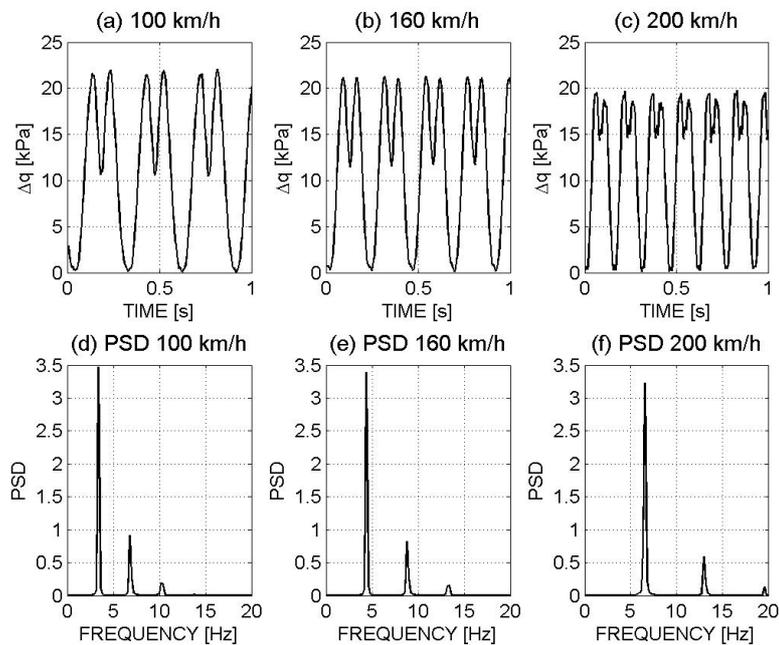


Figure V.28 : Contrainte appliquée à l'échantillon en fonction de la vitesse et indication de la fréquence la plus énergétique (Lamas-Lopez, 2016)

La Figure V.29 représente le chemin de chargement réalisé pour l'éprouvette saturée et non saturée.

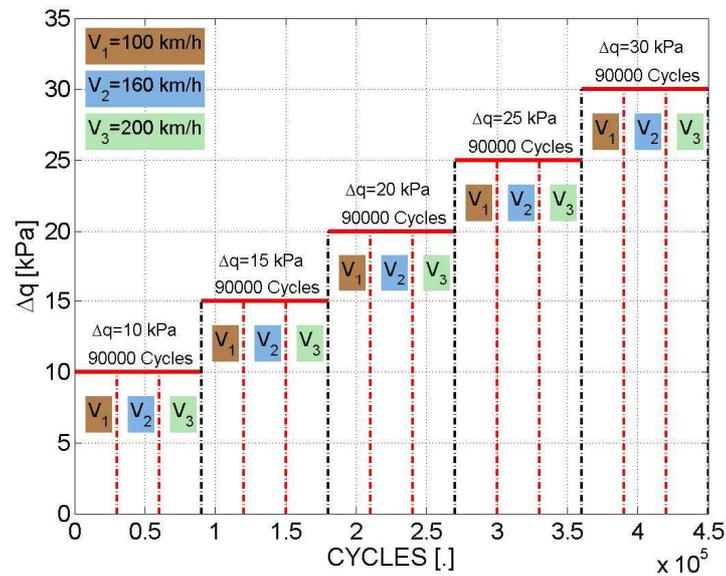


Figure V.29 : sollicitation cyclique appliquée à l'échantillon (Lamas-Lopez, 2016)

a. Analyse des résultats

Si l'on regarde les résultats de ces essais de manière générale, la Figure V.30 a, b, c montre que le module de l'échantillon décroît lorsque celui-ci est saturé en eau. Si l'on regarde plus précisément le résultat de ces essais en fonction de la vitesse d'excitation, on remarque que la charge, pour les vitesses de 100 et 160 km/h (Figure V.30 a et b) n'ont pas d'influence sur le comportement mécanique du matériau, à l'inverse de la teneur en eau.

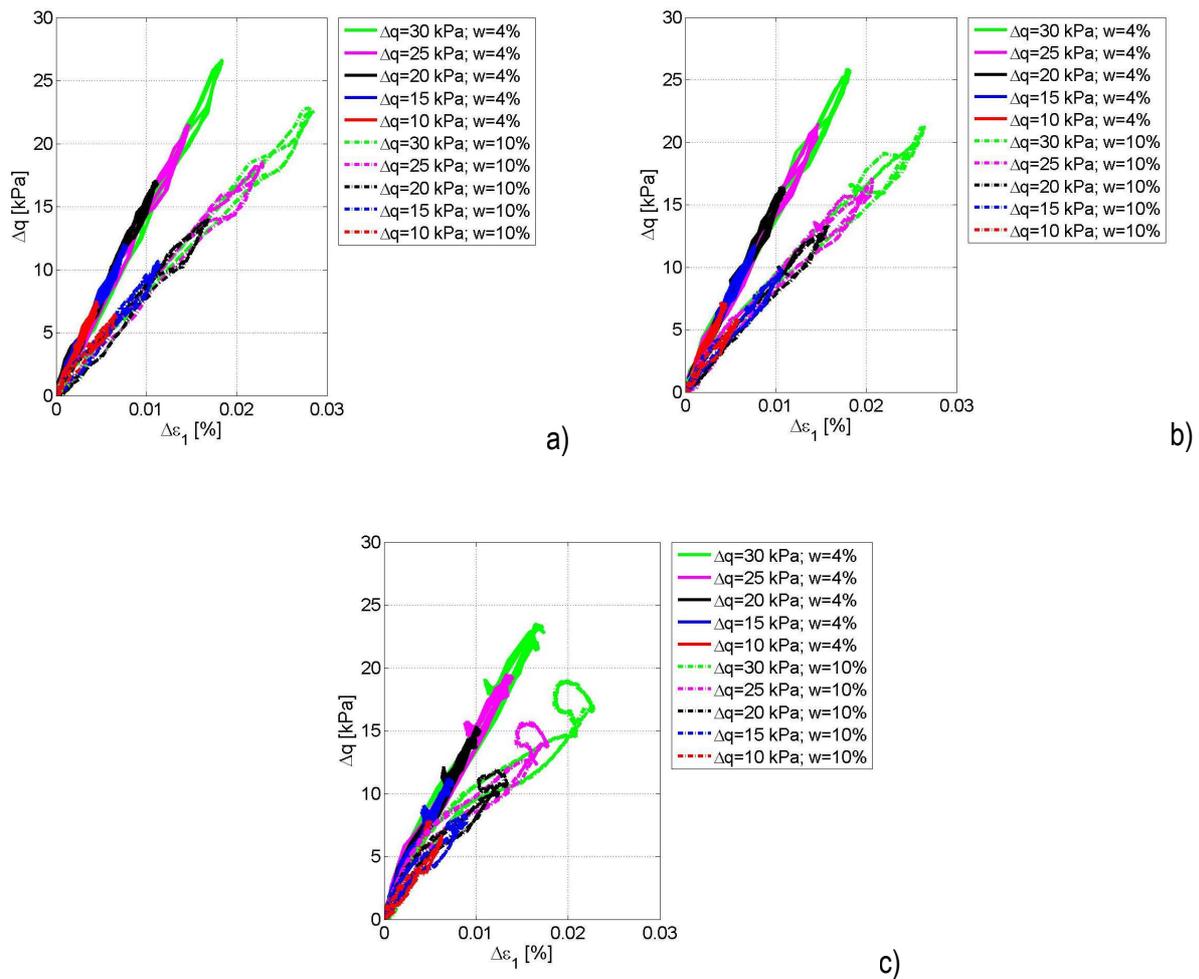


Figure V.30 : Comportement du sol sous chargement (contrainte/déformation) en de la vitesse : a) 100 km/h ; b) 160 km/h ; c) 200 km/h (Lamas-Lopez, 2016)

Mais pour une fréquence d'excitation équivalente à 200 km/h, l'effet de l'amplitude de chargement est visible pour l'échantillon saturé avec, une augmentation des déformations permanentes plus importantes que pour les deux vitesses précédentes. Concernant le comportement de l'échantillon à l'OPM, l'effet de la charge n'est pas visible.

Si l'on analyse le module réversible (M_r), on observe que la teneur en eau a un effet très important sur la décroissance du M_r (Figure V.31). La perte de module est d'environ 35% pour de faibles contraintes déviatoriques et de 50% pour le déviateur maximal ($\Delta q = 30$ kPa).

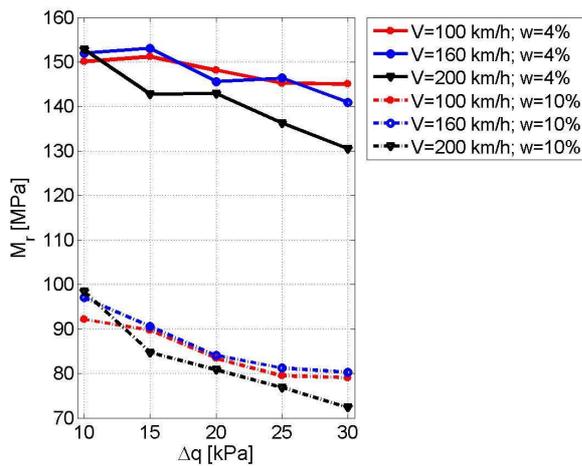


Figure V.31: Evolution du M_r en fonction de la teneur en eau de l'éprouvette et de la contrainte de confinement (Lamas-Lopez, 2016)

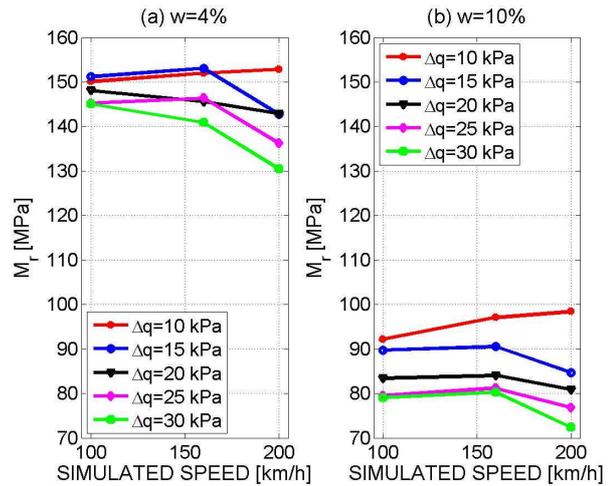


Figure V.32: Evolution du M_r en fonction de la teneur en eau de l'éprouvette et de la vitesse (Lamas-Lopez, 2016)

Pour ce qui est de l'effet de la vitesse sur le comportement du M_r , on observe un seuil à 160 km/h où le module subit une perte importante de ses caractéristiques. Cependant, à faibles valeurs de déviateur, le module réversible a tendance à augmenter. Cette augmentation peut être expliquée par un écrouissage du matériau lors des deux premiers paliers de chargement (100 et 160 km/h) ayant pour conséquence d'avoir densifié l'échantillon avant la dernière sollicitation simulant la vitesse de 200 km/h.

L'analyse du coefficient d'amortissement met en évidence la diminution de celui-ci lorsque le confinement de l'échantillon augmente (Figure V.33). Tout comme le M_r , le comportement de l'échantillon est modifié au-delà de 160 km/h (Figure V.34). La valeur d'amortissement est presque doublée entre ces deux vitesses. Pour ce qui est de l'effet de la teneur en eau, celle-ci n'a pas d'impact sur le coefficient d'amortissement de l'échantillon de la couche intermédiaire.

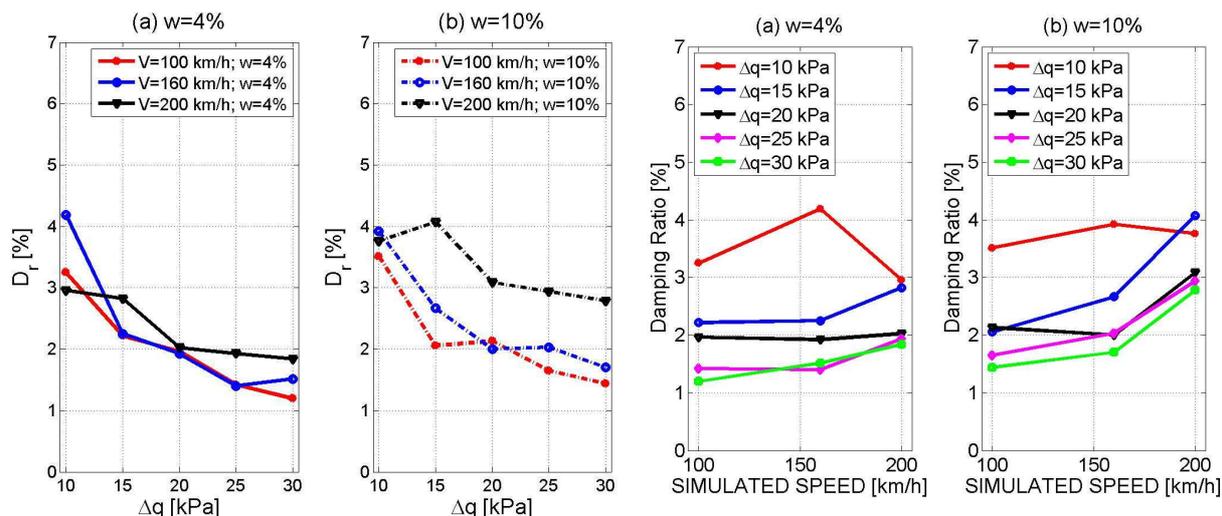


Figure V.33 : Evolution du coefficient d'amortissement en fonction de la teneur en eau et de la contrainte de confinement (Lamas-Lopez, 2016)

Figure V.34 : Evolution du coefficient d'amortissement en fonction de la teneur en eau et de la vitesse (Lamas-Lopez, 2016)

b. Conclusion

Les essais menés par Lamas-Lopez ont permis de mettre en avant l'effet de la teneur en eau sur le comportement cyclique du sol. Il ressort de ces essais que lorsque l'échantillon est saturé, le module réversible M_r est deux fois inférieur à celui de l'éprouvette à la teneur en eau à l'OPM. Ces essais mettent également en avant l'effet de la « vitesse » sur le comportement du sol. Ainsi, au-delà de la 160 km/h, le module réversible de l'échantillon diminue d'une dizaine de pour cent. Cela peut être expliqué, comme a pu le montrer Duong (2013), par le fait que face à des sollicitations cycliques importantes (i.e. fréquence), le sol ne peut dissiper les surpressions interstitielles développées au sein du massif de sol. Si la tendance observée est inférieure à celle obtenue lors des essais in situ, cela peut être expliqué par la perméabilité même du sol. En effet, les éprouvettes de laboratoire étant moins perméable que le sol naturel de Vierzon, la pression interstitielle se dissipe moins facilement.

La tendance du coefficient d'amortissement est elle aussi liée à la teneur en eau de l'éprouvette. On remarque que l'amortissement est plus important (1 point supérieur) lorsque l'échantillon est saturé et que, là encore, le paramètre vitesse est important. Cela peut être expliqué par le fait que l'énergie transmise au sol est emmagasinée par l'eau contenue dans le massif de sol. Cependant, lorsque le sol est plus confiné, l'amortissement diminue du fait de la contrainte de confinement appliquée à l'échantillon.

Dans le cadre de ses travaux, Lamas-Lopez montre l'influence des sollicitations sur le comportement de la couche intermédiaire. Cependant, pour l'approche de dimensionnement, il est nécessaire de regarder l'effet du trafic sur le comportement de l'armement, et sur le comportement de la structure d'assise. A ce titre, divers travaux ont été menés par la SNCF pour appréhender ces impacts en créant la notion de groupe Demaux et en adaptant la loi de Dormon au ferroviaire. Ces deux points sont abordés ci-après.

C. Prise en compte des modifications de trafic dans le dimensionnement de la voie ferrée

Ces dernières années, les projets ferroviaires ont consisté en la création de lignes nouvelles, permettant de relier à grande vitesse les principales villes françaises. Mais du fait du coût de telles infrastructures et de l'impact environnemental de celles-ci, il est nécessaire de s'appuyer sur le réseau des lignes classique pour développer l'offre de service existante. Ainsi, afin d'augmenter la qualité du réseau ferré national, de nombreuses lignes classiques vont faire l'objet de travaux de modernisation qui permettront d'augmenter la vitesse nominale et de la charge à l'essieu. Comme on a vu initialement, cette augmentation peut s'accompagner d'une évolution du groupe UIC qui caractérise le trafic circulant sur la voie. Cependant, avant d'accepter les évolutions des circulations, il est nécessaire de vérifier l'aptitude de la voie à résister au trafic et l'effet des sollicitations sur le comportement du sol support. Pour ce faire, il est nécessaire de déterminer respectivement le groupe Demaux de la ligne et l'influence de la masse des circulations sur le comportement de la couche intermédiaire. Ces deux notions sont détaillées ici.

1. Prise en compte des circulations dans le dimensionnement de la voie

La notion des groupes Demaux (SNCF 2003) trouve son origine dans les années 1940 lors de la réunification des cinq réseaux historiques. Cette union impliquait la circulation de matériel roulant différent tant au niveau de vitesse qu'au niveau de charge à l'essieu. De plus, les règles de conception concernant l'armement étaient également disparates sur ces cinq compagnies. Ainsi, l'interpénétration entre les réseaux des machines à vapeur et de leur tender sur un armement disparate a donc fait apparaître la nécessité d'unifier les règles d'acceptation du matériel roulant. Pour ce faire, une « Commission de circulation des machines » fut créée portant le nom de « Commission Demaux ». Cette dernière avait pour mission d'établir une méthode homogène de classement du matériel roulant permettant leur circulation sur le nouveau réseau ferré national. Ainsi, la commission a généralisé sur

l'ensemble du réseau SNCF les règles de circulation des machines et tenders en considérant les règles les plus libérales qui se justifiaient d'un point de vue de la sécurité des circulations.

Cependant, chacune des Régions travaillait avec ses propres règles de circulation souvent construite de façon empirique. La commission se proposa donc de classer en groupe d'une part les voies comparables et d'autre part les machines comparables en fonction des coefficients d'assimilation. La commission décida, compte tenu de la grande hétérogénéité de voie, de comparer entre eux les différents armements à l'aide de la formule suivante (Équation V-5) :

$$\frac{\left(\frac{I}{v}\right)}{l}$$

Équation V-5

Avec I le moment d'inertie du rail, considéré à demi usure verticale, par rapport à l'axe neutre horizontal ; v la distance verticale entre l'axe neutre horizontal et la fibre la plus éloignée ; l correspond à l'espacement entre axe des traverses les plus écartées.

En parallèle, la commission fixa les critères pour comparer l'influence des circulations par la relation suivante :

$$K \frac{PL^2V^2}{1000E}$$

Équation V-6

Le paramètre K fait intervenir le rôle des bissels (essieu automoteur) et des bogies. Ainsi K vaut 0,5 à 0,6 en cas de présence de bogie, 0,7 à 0,8 si c'est un bissel et 1 en cas d'absence de bissel ou bogie. P est la masse (tonne) de la machine ; L sa longueur (m) hors tampon ; E son empattement (m). Ces paramètres caractérisent la motrice. Le terme V représente la vitesse (km/h) limite de la machine sur chaque ligne (le terme au carré permet de tenir compte de l'effet dynamique).

L'ensemble de ces paramètres a conduit à l'établissement du Tableau V.1 :

Tableau V.I : Classement en groupe de voie comparable : les groupes Demaux

Voie		Numéros des groupes de voies et de machines	Machines à vapeur autorisées à circuler	
Armement	Valeur de $(l/v)/l$ (en mm ²)		Masse maximum de l'essieu le plus lourd	Valeur maximale de $K((PL^2V^2)/1000E)$
Très léger	100 à 140	1	17 t	3 500
Léger	141 à 179	2	18 t	5 500
Moyen	180 à 235	3	20 t	9 300
Fort	236 à 350	4	21 t6	15 500
Très fort	> 350	5	23 t	19 000

Du fait de l'harmonisation des spécifications du matériel roulant, le critère lié aux machines à peu à peu disparu dans l'analyse de la fatigue de la voie. Aujourd'hui, les groupes Demaux comparent encore entre eux les divers types d'armement de la voie qui caractérisent le comportement du rail à la flexion sous charge verticale. Là encore cinq groupes ont été définis (Tableau V.II) pour lesquels une relation est établie :

- Pour les circulations voyageurs, cette relation intègre : le rapport $(l/v)/L$ de l'armement ; la masse à l'essieu du véhicule ; la vitesse maximale du mobile et l'insuffisance de dévers maximale.
- Pour les circulations FRET, cette relation intègre : le rapport $(l/v)/L$ de l'armement ; la vitesse maximale du mobile et l'insuffisance de dévers maximale la charge à l'essieu des wagons et le tonnage moyen mensuel FRET.

Tableau V.II : Groupe Demaux actuellement en vigueur

$(l/v)/l$ (mm ²)	100 à 140	141 à 179	180 à 235	236 à 300	300 à 350	> 350
Groupe DEMAUX	1	2	3	4 bas	4 haut	5

Comme on vient de voir, le groupe Demaux permet de prendre en compte exclusivement le comportement de l'armement sous l'action des charges roulantes. Cependant, cette approche ne permet pas d'intégrer l'effet des charges roulantes sur la couche intermédiaire. C'est pourquoi, il a été nécessaire d'identifier une méthode permettant d'intégrer le comportement de la couche intermédiaire et du ballast sous l'action des circulations. Le Tableau V.III montre comment actuellement la notion de

groupe Demaux est utilisée pour déterminer en fonction de l'armement la vitesse maximale de la ligne mais également l'insuffisance de dévers maximal et exceptionnel.

Tableau V.III: Condition d'armement pour les circulations des trains voyageurs (type III)
sur des voies des 5^{ème} et 4^{ème} groupe Demaux

Type de Rail Vignole	Type de pose	Type de traverses (plancher homogène)	Espace maxi entre axes de traverses (m)	(I/V)/L mini du rail à ½ usure (mm ²)	Vitesse maxi (km/h)	Insuffisance de dévers maximale (mm)	
						Normale / except	
≥ 50 kg /m U50, U36, U50E, U55, U39, UIC54, UIC60, U80.	LRS (abouts chutés pour BN soudées si V > 160 km/h)	U41, U30, U31, RS, SL, VAX U, TB. (2)	0.60	373	220	160	160 ⁽⁴⁾
			0.62	361	160	160	160
			0.64	350	130	150	160
	Ou BN 18m mini pour V < 140 km/h ⁽¹⁾	U21, U20. (3)	0.60	373	160	160	180
			0.62	361	160	160	160
			0.64	350	130	150	160
			0.67	336	120	150	160
≥ 46 kg/m (rail unifié nécessaire pour V>135 km/h)	LRS	U41, U30, U31, RS, SL, VAX U. (2)	0.60	301	160	160	180
			0.62	292	140	160	160
			0.67	271	120	150	160
	Ou BN 18m mini pour V < 140 km/h ⁽¹⁾	U21, U20, TB. (3)	0.58	311	160	160	180
			0.60	301	160	160	160
			0.62	292	135	160	160
			0.67	271	120	150	160

Cependant, comme on vient de le voir avec l'exemple ci-dessus, les outils permettant de déterminer le potentiel de la voie ne concerne que l'armement. Il est donc nécessaire de regarder comment la structure d'assise peut être prise en compte dans la détermination du potentiel mécanique résiduel de la voie ferrée. Le prochain chapitre met en lumière les premiers travaux réalisés dans le domaine routier et ferroviaire, qui permet d'appréhender l'effet de la charge et de la vitesse sur le comportement de la couche de fondation.

2. Influence des charges à l'essieu dans le dimensionnement de la couche intermédiaire

Dans son approche de dimensionnement, la méthode routière permet d'intégrer l'agressivité du matériel roulant en prenant en compte la charge à l'essieu du véhicule et le type de structure (α) sur lequel il circule. L'agressivité A est estimée vis-à-vis de l'endommagement à la fatigue de la chaussée, qui

correspond à la dégradation causée par un essieu de charge P, par rapport à l'essieu de référence P0. Le type d'essieu sollicitant la structure (simple, tandem ou tridem) est intégré par l'intermédiaire du coefficient K. L'agressivité est calculée à l'aide de l'Équation V-7 :

$$A = K \left(\frac{P}{P_0} \right)^\alpha$$

Équation V-7

Comme nous l'avons indiqué précédemment, les coefficients K et α dépendent de la nature du matériau et de la structure de chaussée. Le Tableau V.IV synthétise les valeurs moyennes de ces coefficients, en fonction de la nature de la structure.

Tableau V.IV : Valeur des paramètres K et α pour le calcul d'agressivité d'un essieu routier

	α	K		
		Essieu simple	Essieu tandem	Essieu tridem
Structures souple et bitumineuse	5	1	0,75	1,1
Structures semi-rigide	12	1	12	113
Structures en béton				
- dalles	12	1	12	113
- béton armé ou continu	12	1	/	/

Concernant la sous-couche ferroviaire, une étude réalisée par le Centre d'Etude Technique et d'Expérimentation (CETE) Normandie Centre a montré que le coefficient α pour une structure ferroviaire était de 5.8 (SNCF, 2002), ce qui permet d'apparenter la sous-couche ferroviaire à une structure souple au titre de la classification SETRA-LCPC.

Pour ce qui est de l'approche ferroviaire, le groupe de travail UIC 7/H/14 a travaillé sur « l'adaptation de la plateforme dans l'optique des circulations à grande vitesse et de l'augmentation de la charge à l'essieu ». Les résultats de ce travail ont été exposés par Sauvage (1978) qui consiste à caler un modèle de calcul sur des constatations empiriques. Celles-ci sont les suivantes :

- Pour une PF1, une épaisseur de couche d'assise supérieure ou égale à 60 cm donne systématiquement de bons résultats en termes de tenue du nivellement de la voie. Lorsque l'épaisseur est inférieure à 35 cm, la géométrie est systématiquement médiocre.
- Pour une PF3, une épaisseur de couche d'assise de 35 cm est dans ce cas suffisante pour assurer le maintien de la géométrie de la voie.

Classiquement, la contrainte appliquée au niveau du sol support est calculée à l'aide de la formule de Boussinesq. Le calage de ce diagramme (Figure V.35) est réalisé en prenant en compte l'étude réalisée par Profillidis qui a permis de déterminer, pour une plateforme et pour une épaisseur donnée, la contrainte appliquée au niveau du sol support. Cependant, cette approche permet de ne prendre en compte que le comportement mécanique du sol, et non l'évolution du trafic.

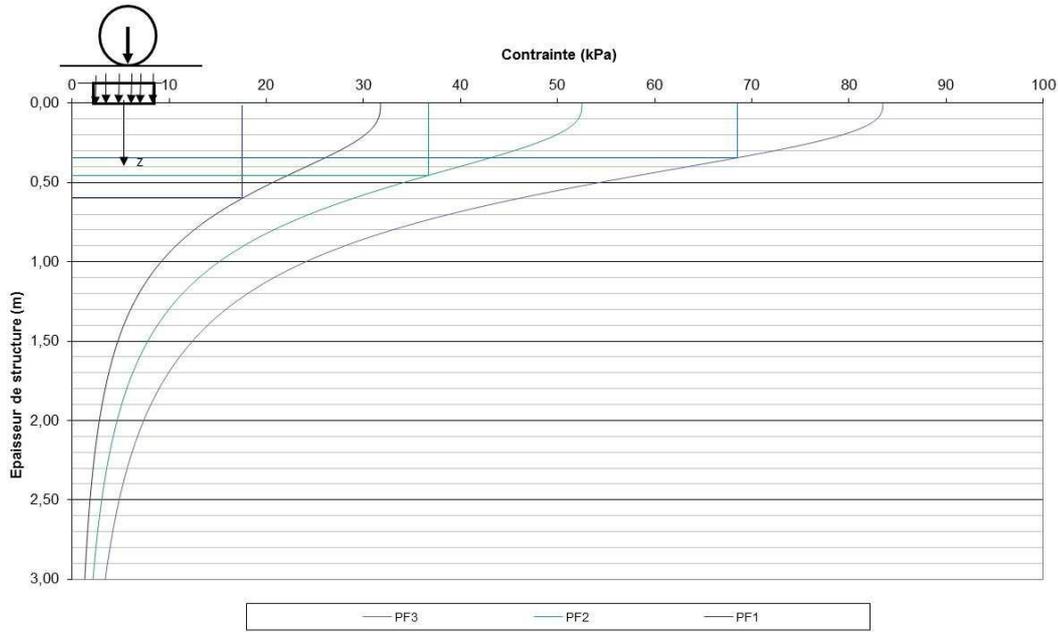


Figure V.35 : Calage des contraintes σ_i en fonction de l'épaisseur de la structure d'assise (ballast – Sous couche)

La prise en compte du trafic est envisageable en utilisant la loi de Dormon, qui permet d'appréhender la déformation maximale admissible des sols soumis à des charges roulantes. Cette loi est caractérisée par la relation Équation V-8, en admettant la proportionnalité entre la déformation unitaire et la contrainte (comportement purement élastique).

$$\frac{\sigma'}{\sigma} = \left(\frac{T/P}{T'/P'} \right)^\alpha$$

Équation V-8

avec T le tonnage circulé (Mg), P la charge à l'essieu (Mg) et σ les sollicitations à la plateforme (kPa).

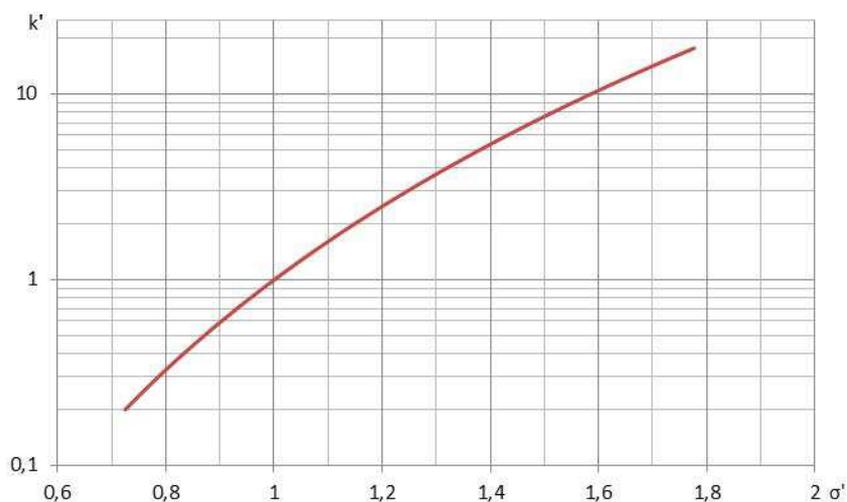
Ainsi, en connaissant le trafic journalier théorique, défini dans la fiche UIC 714R, et la charge à l'essieu maximale sur la ligne, il est possible de déterminer l'impact en termes de contrainte d'une augmentation de trafic aussi bien en nombre qu'en charge à l'essieu sur le comportement de la couche intermédiaire.

Dans la même optique, on peut intégrer l'effet du coefficient d'entretien k dans les sollicitations appliquées à la plateforme. Si l'on considère que pour une ligne donnée, construite dans les Règles de l'Art, le coefficient de maintenance k de la voie est de 1, il est aisé d'extrapoler l'effet de l'augmentation des circulations (en nombre ou en masse) sur le coefficient k. L'Équation V-9 et la *Figure V.36* permettent de visualiser l'effet de l'augmentation de la charge sur la dégradation de la voie.

$$\sigma'_i = \sigma \left(\frac{k'}{k} \right)^\alpha$$

Équation V-9

Ainsi, si l'on double les sollicitations sur la plateforme, le coefficient k fait plus que quintupler, ce qui implique en théorie cinq fois plus de maintenance sur le tronçon ayant subi cette évolution de trafic.



- Figure V.36 : Relation entre le coefficient d'entretien de l'assise k' et la sollicitation sur la plateforme.

D. Discussion

Les différents essais réalisés (laboratoire et in situ) dans le cadre de la thèse de Lamas-Lopez (2016), ont permis d'appréhender l'influence de la vitesse et de la charge sur le comportement de la couche intermédiaire. La tendance des résultats montre que lorsque la vitesse augmente, les déformations (Figure V.15) observées dans le matériau augmentent également. On n'a pas observé une déformation exponentielle au-delà de la vitesse de 160 km/h qui est, selon les référentiels SNCF, le seuil au-delà duquel il est nécessaire de prendre en compte l'effet dynamique. Cependant, le niveau de déformation est également dépendant de la masse à l'essieu du mobile. Plus la charge est importante, plus la déformation est élevée sans pour autant suivre une loi de proportionnalité. L'effet de la charge (Figure V.16) s'observe directement sur la sollicitation appliquée au niveau de chacune des couches, là où, à l'inverse de la déformation, l'écart entre les valeurs est proportionnel au rapport des masses. Ce diagramme met également en évidence l'impact de la couche intermédiaire sur la diminution de la contrainte appliquée au sol support. Cela permet d'augmenter la longévité du matériau ou permet à celui-ci de supporter une charge roulante plus importante.

Comme on a vu précédemment, la pérennité de la couche intermédiaire ne peut être étudiée sans prendre en compte l'influence de l'eau. Comme Duong (2013) l'a montré, un sol saturé, au sein duquel les surpressions ne pourraient se dissiper, amène à une liquéfaction du matériau et ainsi à des remontées boueuses. Lamas-Lopez a donc regardé comment se comportait un échantillon de couche intermédiaire à deux teneurs en eau différentes (OPM et saturé). Les résultats montrent que lorsque l'échantillon est saturé, les déformations permanentes sont plus importantes. Pour ce qui est de l'effet

de la vitesse, les résultats ont mis en avant que pour une fréquence d'excitation équivalente à 200 km/h, l'effet de l'amplitude de chargement est visible sur l'échantillon saturé, où l'on note une augmentation des déformations permanentes plus importante.

Dans l'approche de dimensionnement, il est important de prendre en compte le module réversible (M_r) du matériau qui définit sa capacité à subir des sollicitations sans occasionner de déformation irréversible. Cette notion peut s'apparenter au potentiel mécanique d'une couche et ainsi sa capacité à subir des évolutions de sollicitation (vitesse et charge). Dans le cadre des essais réalisés avec l'AEF, on observe une décroissance du M_r avec la vitesse. Cependant, la charge à l'essieu semble ne pas avoir d'influence sur le comportement de ce module. Les effets de la charge et de la vitesse sont également pris en compte dans les approches de dimensionnement des voies ferrées. Les référentiels SNCF prennent en compte ce paramètre de deux façons. La première est l'intégration d'une épaisseur minimale de structure d'assise pour prendre en compte ces deux facteurs. La seconde joue sur l'armement qui est dimensionné en fonction du trafic qui emprunte la voie (loi de Demaux).

Ces approches sont très empiriques. Elles ont été fiabilisées par les retours d'expérience successifs faits sur le terrain, mais ne permettent pas d'optimiser les épaisseurs de matériaux mis en œuvre. Il est nécessaire à ce jour d'avoir une approche dimensionnelle rationnelle qui permettent d'intégrer le comportement hydromécanique de la plateforme, le type de convoi et l'impact d'une éventuelle évolution de celui. Cet aspect sera abordé dans le prochain chapitre avec la proposition d'une nouvelle approche de dimensionnement.