

Voies précontraintes permettant de réduire les nuisances acoustiques et vibratoires dans l'environnement du métro parisien

Ward Verhelst
 Marie-Noëlle Van Leeuw
 Patrick Vanhonacker
 D2S International
 J. Vandenbemptlaan, 71
 3001 Heverlee
 Belgique
 E-mail : ward.verhelst@d2sint.com
 E-mail : marie-noelle.vanleeuw@d2sint.com
 E-mail : patrick.vanhonacker@d2sint.com

La circulation du métro en tunnel donne naissance à des vibrations qui se propagent, via le sol, aux bâtiments riverains, causant à l'intérieur de ceux-ci des vibrations et/ou un bruit sourd typique appelé bruit solidien. D'autre part, la circulation du métro sur des ponts métalliques fait vibrer ceux-ci, pouvant conduire, dans certains cas, à un bruit assez important rayonné dans l'environnement. Afin de réduire les nuisances engendrées dans ces deux cas, une étude dynamique complète du phénomène a été effectuée, sur base de mesures sur site et de modélisations numériques, conduisant à la mise au point d'une pose de rail précontrainte permettant de réduire de façon significative les nuisances acoustiques et vibratoires dans l'environnement des voies tout en assurant la stabilité de celles-ci. Un nouveau procédé de précontrainte a été développé, permettant d'utiliser des semelles très souples dans les systèmes de fixation du rail (raideur 5 kN/mm). Deux variantes du système de fixation précontraint ainsi défini ont été installées sur deux sections de la ligne 2 du métro parisien : une section en tunnel et une section sur un pont métallique. Après installation, on a mesuré dans les deux cas une réduction importante (jusqu'à 17 dB) des nuisances acoustiques et vibratoires dans l'environnement.

Metros running in a tunnel generate vibrations that propagate, through the ground, to nearby buildings, causing vibrations and/or ground borne noise inside these buildings. Metros running on steel bridges generate vibrations of these bridges, possibly leading, in some cases, to significant noise levels radiated to the environment. In order to reduce the annoyances caused in both cases, a complete dynamic study of the phenomenon was carried out, based on on site measurements and numerical simulations, leading to the design of a pre-loaded rail fixation system enabling to significantly reduce noise and vibration annoyances in the environment while maintaining the track stability. A new pre-loading process has been developed, enabling the use of really soft pads (stiffness 5 kN/mm) into the rail fixation systems. Two variants of this fixation system have been installed in two sections of line 2 of the Paris metro : one section in tunnel and one section on a steel bridge. After installation, in both cases an important reduction (up to 17 dB) of noise and vibration levels was measured in the environment.

Principes de la pose

Le système de fixation précontraint D2S comporte deux couches élastiques constituées par la semelle sous rail et la semelle sous traverse ou sous selle. Cette seconde semelle est précontrainte à l'aide de ressorts qui appliquent une charge atteignant 80 % de la charge statique normale exercée sur la fixation lors du passage d'un véhicule. L'application de cette précontrainte permet de contrôler et de limiter la déflexion verticale du rail.

Par comparaison avec d'autres systèmes de fixation, le matériau utilisé pour la semelle sous traverse ou sous selle possède une raideur statique verticale extrêmement faible, augmentant faiblement avec la précharge. La raideur horizontale est quant à elle élevée et le rapport entre la raideur dynamique et la raideur statique n'excède pas 1,5.

Ce type de conception garantit une déflexion acceptable du rail lors du passage d'un convoi ainsi qu'une fréquence de résonance roue/rail basse.

Ligne 2 du métro parisien entre les stations Ternes et Courcelles

Description du site

Des niveaux importants de vibration et de bruit solidien ont été mesurés dans des habitations résidentielles durant le passage de rames de métro sur la ligne 2 – voie 2 entre les stations Ternes et Courcelles. Il s'agissait d'une voie standard sur ballast avec traverses en bois et semelles rigides sous le patin du rail. Le tunnel double voies a une structure ovale. Il a été décidé d'installer le système de fixation précontraint sur les traverses en bois de la voie 2 sur une longueur de 150 m.

Description du système de fixation précontraint D2S

Un schéma de principe du système de fixation est donné ci-dessous. Il s'agit d'une adaptation d'un concept RATP existant avec des attaches Stedef NABLA. Le résultat est un assemblage très compact.

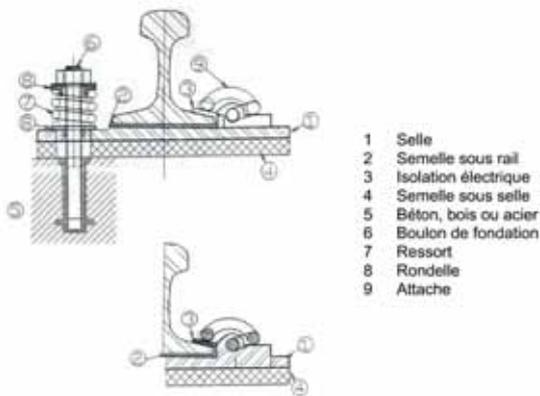


Fig. 1 : Système de fixation précontraint D2S avec semelle sous selle

Les éléments les plus importants de ce système de fixation sont la semelle sous selle en polyuréthane microcellulaire, la selle métallique et les ressorts de précontrainte. Pour cette application (charge à l'essieu de 9 tonnes, traverses en bois sur ballast), la semelle sous selle a une épaisseur de 37 mm et une raideur statique verticale de 4,5 kN/mm. Les ressorts (deux par système de fixation) ont une raideur de 3 kN/mm chacun. Le système de fixation est monté dans la zone d'essai sur de nouvelles traverses. Une précharge de 9 kN est appliquée sur chaque ressort, entraînant une compression des ressorts de 3 mm. Cette précharge (18 kN en tout) résulte en une précompression de la semelle sous selle de 4 mm.

En vue de l'obtention d'un brevet, l'assemblage a été soumis à un essai de fatigue en laboratoire durant 3 millions de cycles. Le comportement statique et dynamique de l'assemblage a été contrôlé avant et après l'essai de fatigue. Les résultats sont tout à fait satisfaisants.

Lors du passage d'un train, la charge exercée par la roue sur l'assemblage atteint 20 kN, ce qui génère à peine une déflexion supplémentaire de 1,9 mm de la semelle sous selle. La charge totale agissant sur la semelle sous selle est en effet de 20 kN (charge à la roue) + 6,6 kN (charge exercée par les ressorts pour une compression résiduelle de 1,1 mm), ce qui donne 26,6 kN. Il en résulte une déflexion totale de 5,9 mm pour la semelle sous selle, soit une déflexion supplémentaire de 1,9 mm (5,9 mm moins 4 mm de précompression).

La raideur dynamique verticale de l'assemblage (6 kN/mm) fournit une première fréquence de résonance calculée comprise entre 25 et 30 Hz.

On obtient donc un système de fixation présentant une raideur dynamique verticale suffisamment basse pour assurer une bonne isolation vibratoire tout en conservant une raideur statique verticale assez importante, permettant d'assurer la stabilité de la voie.

Le remplacement des anciennes traverses par les nouvelles traverses munies du système de fixation précontraint a pris 6 nuits (avec un rythme de 4 heures de travail par nuit) pour les 150 m de voie traités.

Résultats des mesures après installation

Les signaux d'accélération sont enregistrés au cours de plusieurs passages de trains. Ils sont ensuite intégrés afin d'obtenir des niveaux de vitesse en décibels (dBref.10⁻⁸ m/s). Les niveaux de bruit sont également mesurés dans le salon d'une des maisons riveraines. L'ensemble de ces mesures est relatif aux passages de trains RATP munis de 5 voitures et circulant à une vitesse de 50 km/h. Les spectres présentés sont des moyennes sur 12 passages des spectres maximaux mesurés au cours de chaque passage au même point de mesure. Les résultats des mesures sont comparés avant et après l'installation du système de fixation précontraint pour les mêmes points de mesure.

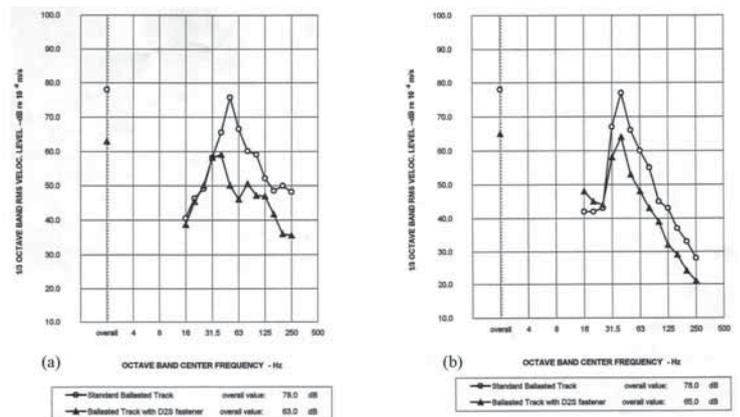


Fig. 2 : Niveaux vibratoires mesurés avant et après installation du système de fixation D2S

La figure 2a présente les niveaux de vibration mesurés sur la paroi du tunnel la plus proche de la voie 2 et à une hauteur de 2 mètres au-dessus du ballast. La figure 2b indique les niveaux de vibration mesurés sur le sol en avant des bâtiments riverains. La figure 3 présente le spectre de bruit mesuré dans le salon d'une des maisons riveraines du tunnel.

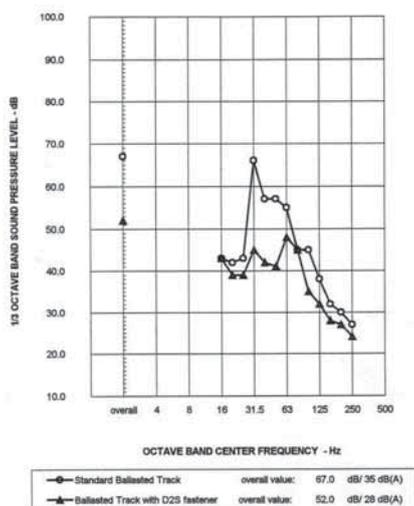


Fig. 3 : Niveaux de pression acoustique mesurés avant et après installation du système de fixation D2S

Les déplacements verticaux et horizontaux de la semelle sous selle ont été enregistrés durant plusieurs passages de trains. Les déplacements maximaux mesurés sont de 1,79 mm (vertical) et 0,87 mm (horizontal).

En comparant les résultats des mesures effectuées lors de passages de rames de métro sur la voie ballastée munie du système de fixation précontraint D2S avec les données disponibles sur la voie ballastée classique, nous pouvons conclure que :

- Le système de fixation précontraint D2S permet d'obtenir une importante réduction des niveaux de vibration au-delà de 25 Hz. Cette réduction est en général supérieure à 10 dB entre 40 Hz et 200 Hz. Le niveau global de vibration entre 5 Hz et 250 Hz est, quant à lui, réduit de 13 dB.

- La pression acoustique mesurée dans le salon d'une maison riveraine a été réduite de 15 dB, donnant une réduction de bruit de 7 dB (A).

- Les déplacements de la semelle sous selle sont limités en direction verticale et horizontale. C'est la compression initiale élevée de la semelle sous selle (compression supérieure à 80 % de la charge répartie à la roue) au moyen de ressorts (qui sont pratiquement non chargés au moment du passage du train) qui permet d'assurer une réduction importante des vibrations et un déplacement limité du rail. De plus, le passage d'un train n'entraîne qu'une très faible compression supplémentaire de la semelle sous selle. Le matériau utilisé pour cette semelle doit avoir une raideur dynamique faible de manière à isoler au maximum des vibrations. Il doit également présenter une très faible augmentation de raideur sous précontrainte, et doit être assez rigide en direction transversale. Le polyuréthane microcellulaire remplit parfaitement ces conditions. La raideur de la semelle sous traverse et la raideur des ressorts sont sélectionnées en fonction des charges à l'essieu et de l'isolation vibratoire recherchée.

- Les performances élevées ainsi que le faible coût de cet assemblage font de ce système de fixation précontraint D2S une solution très intéressante. Cet assemblage est déjà utilisé sur des traverses en bois et en béton ou pour des fixations directes sur plate-forme béton. Il est par ailleurs une alternative à la pose sur dalle flottante du fait du gain de 13 dB au niveau de l'isolation vibratoire par rapport à une pose standard sur ballast.

Optimisation du système

Le système de fixation décrit ci-dessus présente toutefois un inconvénient lié au contact existant entre les ressorts de compression et la selle. Ce contact entraîne une mise en parallèle des ressorts avec la semelle sous selle, ce qui augmente la raideur dynamique de l'ensemble du système de fixation.

Afin de supprimer ce problème, c'est une adaptation de ce système de fixation qui équipe maintenant la ligne 2 entre Ternes et Courcelles. Dans ce nouveau système, chaque ressort de précontrainte est dédoublé en deux ressorts de raideurs différentes. L'un permet de donner la précontrainte et l'autre permet de découpler le ressort de grande rigidité lors du passage du convoi. Les améliorations obtenues par rapport au système classique sont :

- une diminution de la raideur dynamique verticale de l'assemblage, conduisant à une fréquence de résonance roue-rail de l'ordre de 20 Hz (au lieu de 25-30 Hz précédemment),
- une réduction supplémentaire de 2 à 4 dB sur le niveau vibratoire maximal global (vitesse vibratoire) entre 0 et 250 Hz au piedroit du tunnel,
- une réduction supplémentaire de 2 à 3 dB au niveau du seuil des bâtiments riverains du tunnel,
- un suivi de l'évolution de la voie dans le temps a également montré qu'elle présentait une souplesse suffisante pour prévenir la formation de l'usure ondulatoire.

Le Pont du Nord à Paris

Description du problème

Certaines lignes du métro parisien opèrent sur des ponts métalliques datant du début du siècle passé. Ces ponts émettent un bruit solide élevé lors du passage des métros. Étant donné que la modification de la structure de ces ponts n'est pas envisageable, c'est sur la voie qu'il faut agir pour réduire le niveau des vibrations du pont et le niveau du bruit émis. Ce chapitre décrit l'utilisation du système de fixation précontraint D2S dans le cadre du projet de rénovation du *Pont du Nord* à Paris. Le *Pont du Nord* est situé sur la ligne 2 à proximité de la station *La Chapelle*. La structure métallique est vieille de près de 100 ans. Les rails sont montés sur des traverses en bois directement boulonnées au tablier métallique.

Étude dynamique du pont existant

Le comportement du pont est étudié en combinant les mesures statiques et dynamiques avec la modélisation numérique (méthode des éléments finis).

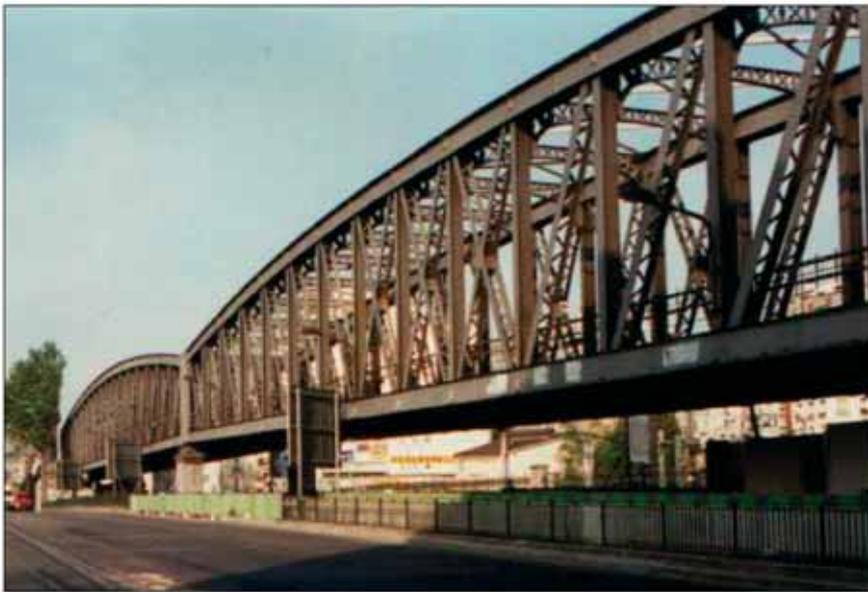


Fig. 4. : Le Pont du Nord à Paris (métro)

Mesures durant le passage de convois

Les mesures suivantes ont été effectuées durant le passage des convois :

- Mesure des niveaux et spectres (domaine fréquentiel) vibratoires sur le tablier du pont
- Mesure des niveaux et spectres (domaine fréquentiel) acoustiques à proximité
- Mesure des niveaux de contraintes dans la structure du pont et mesure des déflexions du pont.

Les principaux résultats sont résumés comme suit :

- Une déflexion verticale maximale de 8 mm au milieu de la travée du pont. Les niveaux vibratoires atteignent une amplitude de 22 mm/s et les spectres de vitesse vibratoire présentent une contribution importante aux fréquences allant jusqu'à 200 Hz.
- Les contraintes mesurées dans la structure du pont atteignent une valeur maximale de 17 MN/m².
- Le spectre de bruit pondéré A mesuré sous le pont présente un maximum dans la bande de 1/3 d'octave de 160 Hz. La pression acoustique maximale sous le pont est de 102 dB (A).
- Le déplacement vertical relatif entre le rail et le tablier du pont est de 0,7 mm.

Analyse modale expérimentale

D'autre part, une analyse modale expérimentale de l'ouvrage a également été réalisée. Le pont est excité artificiellement à l'aide d'une masse de 120 kg. Un capteur d'effort est placé entre la structure du pont et la masse. L'ensemble du système d'excitation est situé sous le tablier du pont et est conçu afin d'exciter le pont jusqu'à 50 Hz.

Modélisation numérique

Un modèle éléments finis de l'ouvrage a également été établi. Ce modèle est représenté à la figure 5. Il comporte 3 959 nœuds et 6 551 éléments (de type coque et poutre).

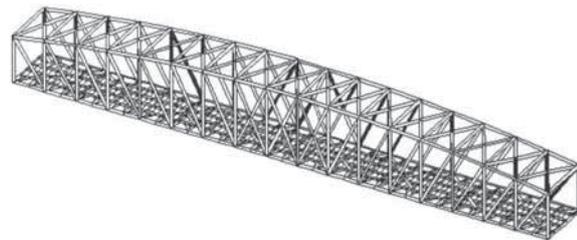


Fig. 5 : Modèle éléments finis du Pont du Nord à Paris

Les analyses suivantes ont été réalisées :

- La déflexion du pont et les contraintes dans la structure sont calculées pour des charges statiques correspondant aux passages des convois. La raideur du système de fixation du rail et les conditions limites (raideurs transversale et verticale des appuis du pont) sont adaptées de manière à faire correspondre les contraintes et déflexions mesurées et calculées lors du passage d'un train. Cette adaptation est réalisée de manière itérative sans processus automatique de recalage. Des valeurs tout à fait réalistes sont obtenues pour les paramètres concernés.

- Une fois le modèle éléments finis recalé, les fréquences de résonance et les modes propres sont calculés.

Une bonne corrélation est obtenue entre les mesures et les calculs, comme on peut le voir dans le tableau ci-après page 20 :

Certains modes propres calculés et mesurés sont repris aux figures 6 à 9. Aucun autre recalage du modèle n'est entrepris étant donné la bonne corrélation obtenue entre les mesures et les calculs.

Fréquence de résonance		Mode propre
Calculée [Hz]	Mesurée [Hz]	
3.12	2.75	1 ^{ère} flexion verticale
4.18	3.75	1 ^{ère} torsion
4.82	5.00	1 ^{ère} flexion horizontale
8.33	6.75	2 ^{ème} flexion verticale
9.80	9.75	2 ^{ème} torsion
10.71	11.75	2 ^{ème} flexion horizontale
12.15	12.75	3 ^{ème} flexion verticale
13.69	13.25	3 ^{ème} torsion
16.94	15.75	3 ^{ème} flexion horizontale

Table 1 : Comparaison des fréquences propres calculées et mesurées

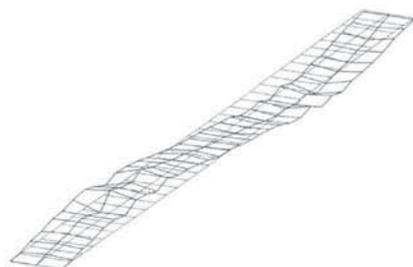


Fig. 6 : 2e flexion verticale à 6, 75 Hz (mesurée)

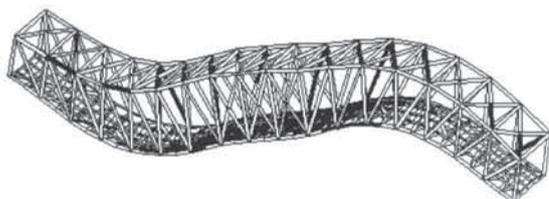


Fig. 7 : 2e flexion verticale à 8, 33 Hz (calculée)

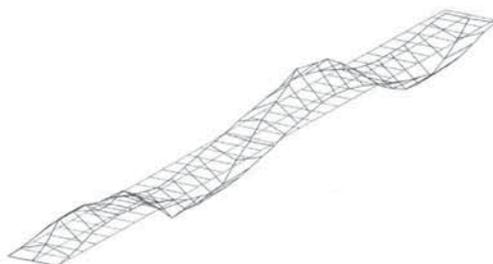


Fig. 8 : 3e flexion verticale à 12, 15 Hz (mesurée)

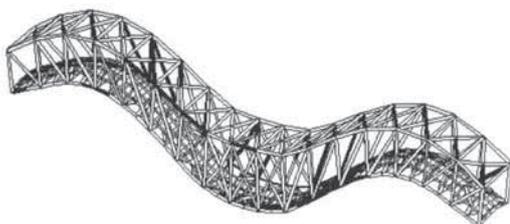


Fig. 9 : 3e flexion verticale à 12, 75 Hz (calculée)

Modification de la voie

Afin de réduire le bruit solide basse fréquence émis par le pont entre 30 et 200 Hz, il a été décidé de modifier la raideur du système de fixation du rail de manière à créer un meilleur filtre d'isolation des vibrations. Le modèle recalé du pont a été utilisé pour calculer le gain relatif en vibrations du pont (jusqu' à 200 Hz) pour une excitation type impact aux interfaces roue/rail, en considérant la raideur originale (200 kN/mm) et la raideur du nouveau système de fixation du rail (20 kN/mm). Le gain calculé pour les vibrations basses fréquences et donc pour le bruit solide est de 10 dB. Cette réduction du bruit à basse fréquence donne une réduction générale calculée de la pression acoustique sous le pont de 6 dB (A).

La suspension flexible est réalisée au moyen de semelles anti-vibratiles précontraintes placées entre les traverses et le tablier du pont. La précontrainte est obtenue en équipant les boulons qui fixent les traverses au tablier du pont de ressorts sur la partie supérieure de la traverse.

Les semelles ont été installées selon le concept DS-ISO-RAIL pour la fixation du rail : alternance de semelles sous traverse plus ou moins flexibles. Il en résulte une fréquence de résonance roue/rail basse (calculée pour ne pas coïncider avec les fréquences de résonance du pont) et une faible déflexion statique du rail. Cette combinaison est nécessaire pour une isolation vibratoire optimale.

Cette solution a été conçue spécialement pour éviter la coïncidence entre les fréquences de résonance du système de fixation du rail et les fréquences de résonance du pont.

Résultats

Des mesures vibratoires et acoustiques ont été réalisées après la modification de la voie et ont mis en évidence les points suivants :

- Les niveaux de bruit sont réduits de 9 dB (A).
- Les niveaux vibratoires sur le tablier du pont sont réduits d'un facteur 3 à 4 entre 0 et 200 Hz.
- La déflexion maximale du rail est inférieure à 3 mm. La voie est par conséquent stable.
- Les objectifs de l'étude ont été remplis, voire dépassés. On a pu observer une très grande correspondance entre les valeurs mesurées après rénovation et les valeurs prévisionnelles.

Conclusion

La RATP dispose avec les poses de voie précontraintes de techniques de pointe pour éliminer la gêne acoustique des riverains et les problèmes de bruit structurel associés, ainsi que les problèmes d'usure ondulatoire. Le système de la pose précontrainte est applicable en tunnel et sur

viaduc, avec pose ballastée et pose béton. Le système assure une stabilité de la voie ainsi qu'une isolation vibratoire optimales. Pour certaines configurations, on peut obtenir des performances allant jusqu'à celles de la dalle flottante, avec un coût et une durée d'installation sensiblement plus faibles.

Ce système a aussi été utilisé avec succès :

- en tunnel et sur pont métallique à New York (réseau métro) pour lutter contre le bruit structurel
- en courbe sur le réseau tramway d'Anvers (en Belgique) pour lutter contre le bruit de crissement.

Il sera installé dans les prochains mois à Milan et Stockholm, pour les réseaux métros respectifs de ces deux villes.

