

Etude de cas : Protection vibratoire d'un bâtiment de logements en bordure de voie ferrée par coupure verticale

L'exemple du projet mixte HIKARI situé à Lyon 2^{ème} Confluence

Pierre Brie,
Samuel Tochon-Danguy
LASA Sud Est
Immeuble le Britannia
20, boulevard Eugène Deruelle
69003 Lyon
E-mail : sudest@lasa.fr



Fig. 1 : Le projet HIKARI, à Lyon Confluence © KKA / Cyrille Thomas

Contexte

Au cœur du projet urbain Lyon Confluence, l'îlot Hikari est un programme Bouyges Immobilier – SLC Pitance alliant bureaux, commerces et logements au sein de trois bâtiments.

Longeant la place nautique du nouveau quartier, ce projet à énergie positive a été dessiné par l'architecte Kengo Kuma & Associates, et la maîtrise d'œuvre intégrait le bureau d'étude acoustique EAI.

L'étude de cas présentée ici propose un diagnostic vibratoire réalisé dans le cadre de ce projet par le LASA, intervenant en phase de conception et d'exécution des travaux en tant que conseil en ingénierie vibratoire auprès de la maîtrise d'ouvrage, de la maîtrise d'œuvre et de l'entreprise titulaire du lot gros œuvre.

Le bâtiment NISHI comprend cinq étages de bureaux et deux étages de logements qui occupent la partie supérieure de l'immeuble.



Fig. 2 : Avant travaux : Limite de la parcelle et ouvrage SNCF surélevé

De part son implantation, une de ses façades se situe à 5 m d'un pont SNCF dont la fréquentation observée de la voie ferrée est de soixante-quinze trains par période diurne (7h – 22h) et dix trains par période nocturne (22h – 7h), pour une vitesse moyenne de l'ordre de 50 km/h.

La méthodologie qui a été proposée s'articule autour de trois sessions de mesures vibratoires à trois étapes distinctes du terrassement :

- Avant le terrassement : mesure dans le terrain ;
- Pendant le terrassement : mesure en tête de pieu support de radier ;
- Après le terrassement et la réalisation d'une coupure antivibratoire verticale : mesure sur la structure principale du bâtiment (radier, gros œuvre).

Compte tenu des nombreuses sources d'incertitude afférentes à la mesure de sollicitation vibratoire se propageant dans un terrain, cette démarche en trois temps a permis de corrélérer le diagnostic réalisé dans le terrain avec une nouvelle campagne de mesures bénéficiant de pieux fondés comme support de capteur. Une troisième campagne de mesures, une fois le terrassement et la coupure antivibratoire verticale achevés, a permis une étape supplémentaire de corrélation des mesures, et en l'occurrence la validation des traitements anti-vibratoires mis en œuvre.

Diagnostic initial

Parmi les effets possibles des vibrations engendrées dans l'environnement puis transmises dans les bâtiments par le passage de matériel ferroviaire, on peut généralement distinguer :

- Les dommages (généralement inexistant) pouvant être provoqués dans les structures de certains bâtiments,
- Les perturbations de locaux sensibles ou bâtiments d'habitations avec une perception directe des vibrations (perception tactile),
- Les perturbations dans les bâtiments de logements ou bâtiments sensibles (logements, cinémas, studios TV, radio, bureaux,...), dues à la perception du bruit rayonné par les structures et réémis dans le local (perception auditive). Cette perturbation est généralement celle qui est prépondérante puisque les seuils de perception auditive sont plus bas que les seuils de perception tactile chez l'être humain,

- Les perturbations dans les bâtiments ou les installations très sensibles (microscopes, fabrication de composants électroniques, utilisation de lasers,...).

Le diagnostic vibratoire initial a été conduit sur la base d'une campagne de mesures vibratoires sur la parcelle, avant le début des opérations de terrassement, pour comparer les niveaux vibratoires susceptibles d'être transmis au futur bâtiment avec les seuils de référence courants pour chaque critère.

Mesures réalisées

Plusieurs capteurs de niveaux vibratoires ont été installés sur le terrain du futur projet. Les durées de mesure étaient d'environ 1 heure pour les points de mesure d'investigation (au nombre de deux) et d'environ 24 heures pour les autres points de mesure (cinq points fixes).

La position des points de mesures a été choisie de manière à être alignée avec les futures façades du bâtiment (et les fondations). Le nombre de points de mesures installés a permis un certain « quadrillage » du terrain sur lequel a été construit le projet.

Les capteurs de vibrations qui ont été utilisés sont des capteurs d'accélération ou de vitesse mono axe ou tri axes selon les points de mesure.

Direction prépondérante des vibrations

La mesure des vibrations selon trois axes a montré que la sollicitation selon l'axe perpendiculaire aux voies était prépondérante, les niveaux vibratoires relevés par bandes de tiers d'octave étaient supérieurs de 5 à 15 dB par rapport aux sollicitations dans les autres directions de mesure.

Analyse des risques de dommage aux structures et perception tactile

Pour l'analyse des risques de dommage aux structures, les critères qui ont été pris en compte sont ceux des règles techniques annexées à la circulaire du 23 juillet 1986 relative aux vibrations mécaniques émises dans l'environnement par les installations classées,

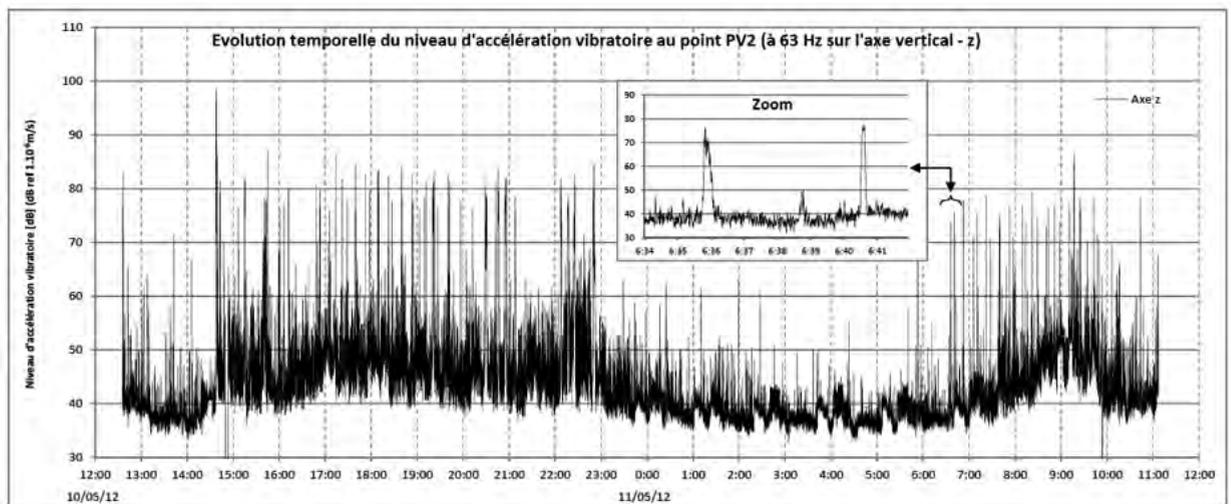


Fig. 3 : Evolution temporelle d'un point de mesure vibratoire sur 17 h, chaque pic est un passage de train

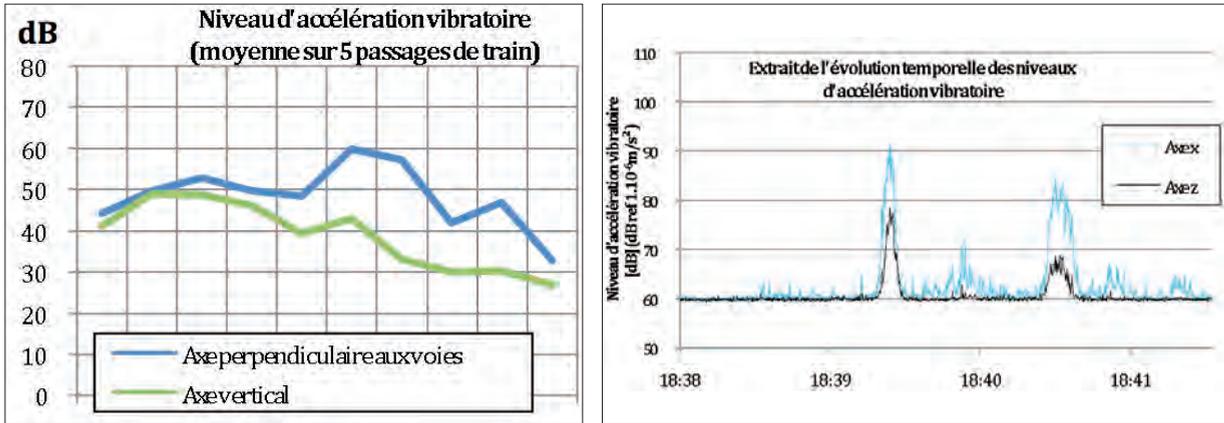


Fig 4 : Exemple de point de mesure triaxe situé à 15m des voies

en assimilant les sources ferroviaires à des vibrations continues ou assimilées. Le bâtiment a été considéré comme une « construction résistante » au sens de cette circulaire. La norme DIN 4150-3 intitulée « Vibration dans les bâtiments – Effets sur les structures » a également été utilisée pour évaluer ce critère.

Par ailleurs pour l'analyse des risques de perception tactile, les normes ISO 2631-1 et ISO 2631-2 définissent des niveaux de vibrations maximums acceptables suivant le type de bâtiment et/ou d'activité.

Les niveaux vibratoires qui ont été relevés sur site lors de passages de trains (voyageurs et FRET confondus) étaient nettement en deçà des niveaux vibratoires maximum fixés par la circulaire du 23 juillet 1986 pour ce type de construction.

Par ailleurs, les niveaux vibratoires relevés ou estimés étaient inférieurs au seuil de gêne par perception tactile (Zones critiques de travail) indiqué dans la norme ISO 2631 (en dessous duquel il n'est généralement pas constaté de plainte) et *a fortiori* inférieurs à la courbe de référence « Résidence nuit » de la norme DIN 4150-2.

Seuls les niveaux vibratoires relevés sur l'ouvrage SNCF étaient très proches des courbes de gêne par perception tactile, ce qui aurait pu représenter un risque si le bâtiment avait été directement adossé à l'ouvrage supportant les voies.

Les niveaux vibratoires qui ont été estimés comme pouvant être transmis au futur bâtiment ne présentaient donc pas de risque de dommage aux structures ou de gêne par perception tactile.

Analyse des risques de gêne sonore

Le risque de gêne par réémission sonore des vibrations transmises au sein du bâtiment est typiquement le plus élevé par rapport aux risques vibratoires vérifiés précédemment. L'analyse de ce risque est également plus délicate du fait qu'il dépend d'un plus grand nombre de paramètres. Citons entre autre la difficulté d'anticiper le comportement vibratoire aux interfaces gros œuvre/second œuvre, qui sont directement dépendantes des systèmes constructifs retenus et des procédés de mise en œuvre afférents. Ou encore la difficulté pour les bureaux d'études d'utiliser des modèles prédictifs numériques (SEA, éléments finis), méthodes qui sont rarement en adéquation avec le cadre de nos missions de diagnostic et les délais impartis.

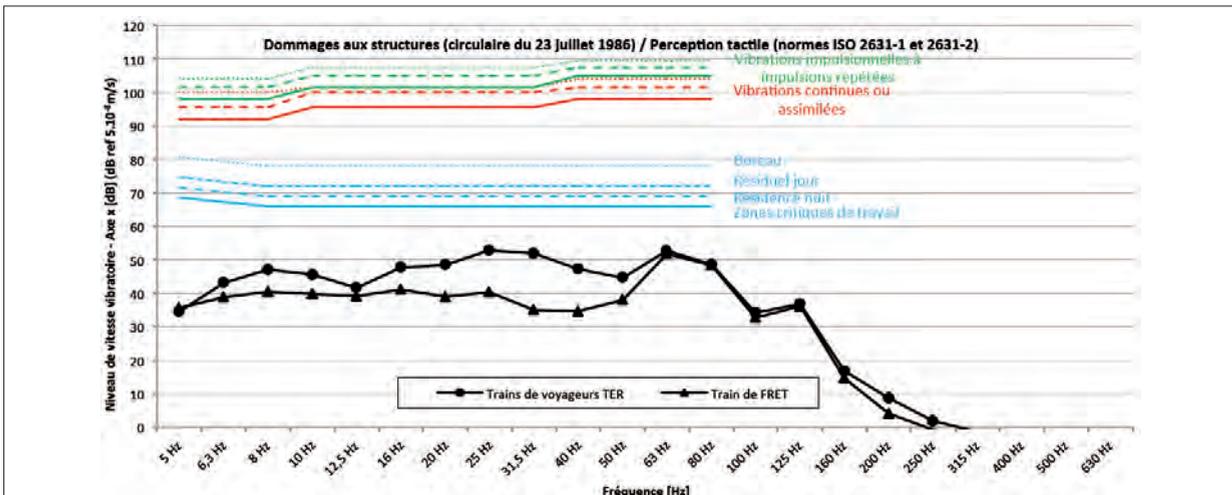


Fig 5 : Comparaison des niveaux de vitesse mesurés avec des seuils de vérification de dommages aux structures et de perception tactile. Capteur situé dans le terrain à 15m des voies. Moyenne au passage des trains

Pour cette étude de cas, la méthodologie qui a été employée pour caractériser le risque de gêne sonore est une estimation basée sur une méthode de calculs analytiques LASA croisés avec l'expérience d'études antérieures comparables.

Pour chaque point de mesure, un calcul analytique de réémission sonore a été effectué pour un local théorique de 12 m² dont les six parois seraient en béton armé de 20 cm. Les hypothèses qui ont été prises pour ce local sont sécuritaires. Les niveaux de pression acoustique estimés par rayonnement sont comparés à 2 spectres types de résiduel intérieur calibrés à 20 et 30 dB(A).

Quel cahier des charges ?

Il n'y a pas à proprement parler de réglementation spécifique relative aux bruits rayonnés par transmission solide dans les bâtiments. Par ailleurs le phénomène est complexe, car s'agissant généralement de bruits intermittents (uniquement au passage du matériel roulant), les niveaux sonores globaux moyennés à l'échelle d'une journée ou d'une nuit peuvent paraître faibles au regard des critères habituels. Mais les émergences lors des passages peuvent s'avérer gênantes car pouvant par exemple perturber la concentration, le sommeil, etc.

Par ailleurs, compte tenu de l'amélioration constante de l'isolation thermique et acoustique des façades des bâtiments, il est de plus en plus courant de mesurer des niveaux sonores résiduels intérieurs de l'ordre de 20 à 25 dB(A) voire moins. Ceci notamment dans des pièces calmes (chambres) donnant sur une cour intérieure ou bénéficiant de l'effet d'écran du bâtiment lui-même vis-à-vis d'une infrastructure de transport. Les niveaux dans les basses fréquences (de 20 à 125 Hz) peuvent également être relativement bas, et ainsi le grondement sourd de la vibration du passage d'un train ou d'un tramway être clairement perceptible même si le niveau global au passage reste de l'ordre de 30 dB(A).

Dans tous les cas, une émergence d'un bruit intermittent supérieure à 10 dB, que ce soit en niveau global ou pour une seule plage de fréquences, par rapport au bruit résiduel, est susceptible d'engendrer une gêne et une plainte en cas d'occupant sensible.

Pour ces différentes raisons il a été proposé de viser l'objectif de niveau sonore global généré au passage d'un train par rayonnement de 25 à 30 dB(A) dans les logements, 35 à 45 dB(A) dans les bureaux, et que le rayonnement sonore n'engendre pas d'émergence spectrale supérieure à 10 dB.

En regard de cet objectif, les niveaux sonores estimés par rayonnement pour les cas les plus défavorables (logements les plus proches des voies) étaient trop élevés. Il a donc été proposé de prévoir un traitement anti-vibratile.

Un compromis technico-économique

Les conclusions de ce diagnostic ont permis d'ouvrir une discussion entre la maîtrise d'ouvrage, la maîtrise d'œuvre et l'entreprise. Le choix de suspendre un bâtiment est souvent conséquent en termes d'impact sur les systèmes de fondations du bâtiment (contraintes sismiques, technologie requise par le sol...), sur la hauteur du bâtiment (limitée par le POS), etc, et peut avoir un impact financier sensible.

Afin d'obtenir des gains confortables dans tous les axes de propagation, il aurait été préférable de suspendre le bâtiment sur boîtes à ressorts (gains possibles de l'ordre de 15 à 25 dB pour les fréquences de 40 à 125 Hz), ou sur plaques antivibratiles (gains possibles de l'ordre de 8 à 15 dB pour les fréquences de 40 à 125 Hz). Cependant, les sollicitations vibratoires prépondérantes étant dans l'axe horizontal perpendiculaire aux voies, et les types de solution décrits ci-dessus n'étant *a priori* pas compatibles avec les contraintes de génie civil, de fondations, et l'économie du projet, il a été proposé d'opter pour une tierce solution de traitement antivibratoire. Il s'agit d'un système de type coupure verticale, le long de la paroi des sous-sols mitoyenne avec les voies SNCF, par interposition d'un matelas résilient.

Le gain attendu de ce type de solution de traitement était de l'ordre de 5 à 10 dB pour les fréquences comprises entre 40 et 125 Hz.

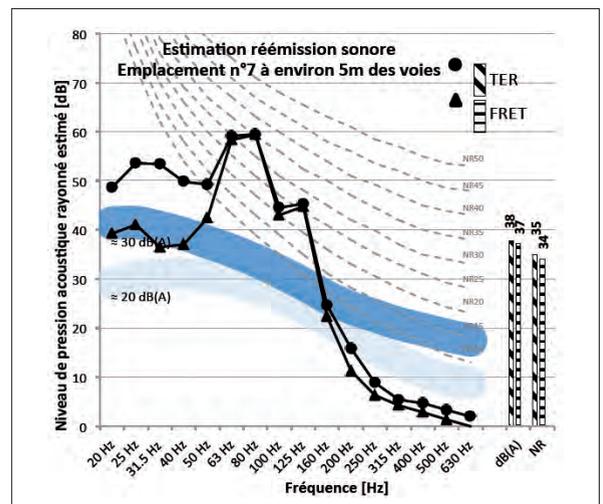
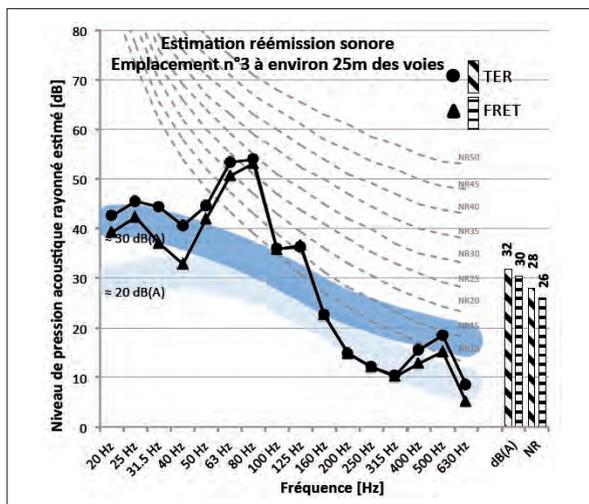


Fig. 6 : Exemples de niveaux sonores par rayonnement estimés à partir de 2 emplacements de mesures distincts

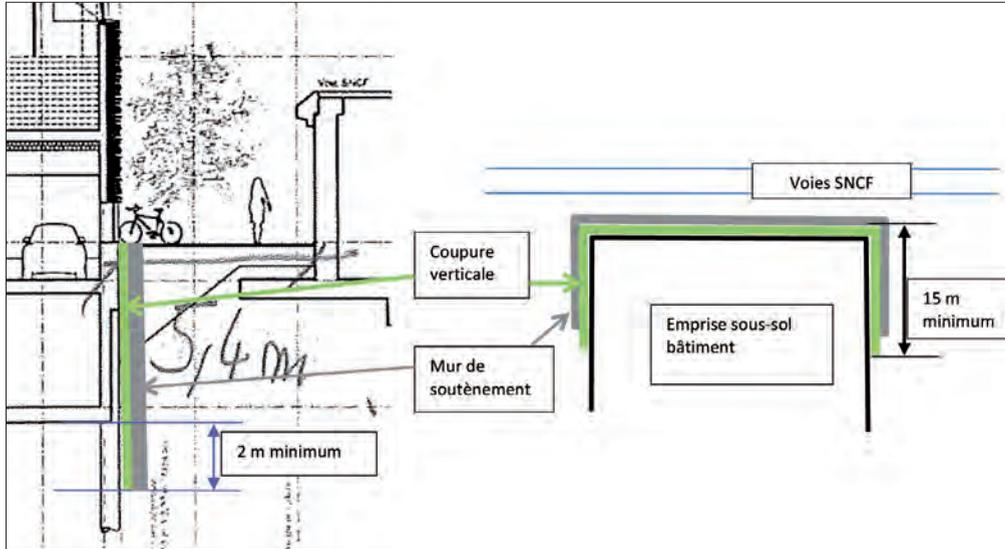


Fig. 7 : Coupe de principe de la coupure verticale envisagée

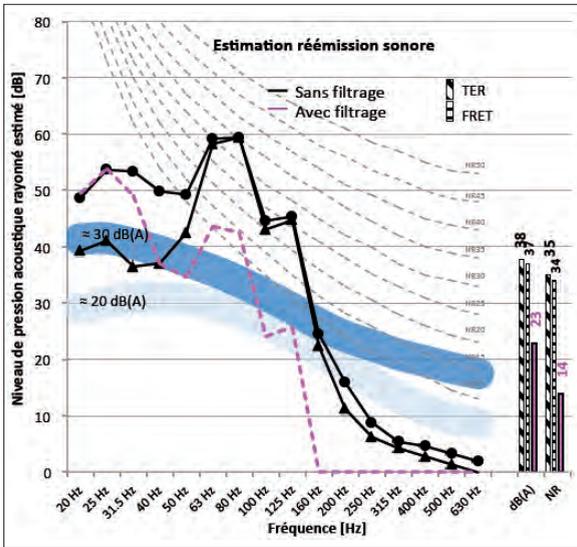


Fig. 8 : Niveaux sonores par rayonnement estimés après coupure verticale au point de mesure le plus défavorable

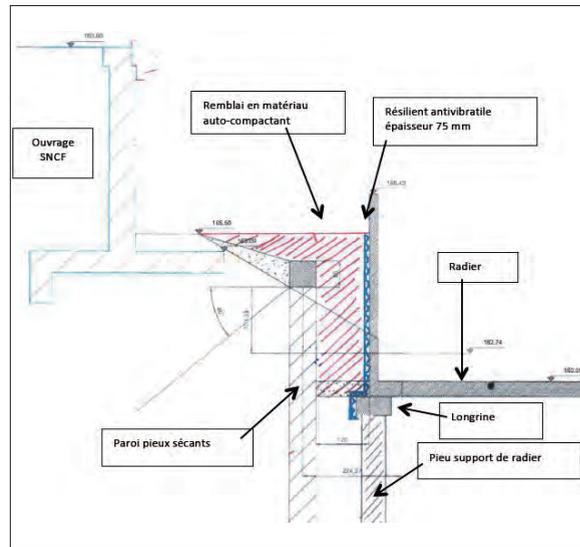


Fig. 9 : Coupe de principe de la coupure verticale après modifications

Evolution de la solution de principe et mesures de corrélation

Les concertations avec la SNCF ainsi que le développement des études de fondations et de structure ont amené quelques modifications au principe de découplage. En effet, afin de garantir le non-affaissement de la voie pendant la réalisation des fondations, une paroi de pieux-sécants a dû être réalisée, modifiant sensiblement l'interface de propagation vibratoire entre les rails et le futur bâtiment. L'entreprise a proposé d'utiliser un matériau auto-compactant pour remplir l'espace entre la paroi pieux-sécants et le résilient.

Mesures intermédiaires sur tête de pieu support de radier

Une fois la phase de terrassement entamée, de nouvelles mesures vibratoires ont été réalisées en fixant les capteurs en tête de pieux supports de radier.

Les nouvelles mesures vibratoires ont confirmé les conclusions tirées du diagnostic initial, en termes de risques liés aux vibrations propagées dans le terrain ainsi qu'en termes de solutions de traitement antivibratile adéquates. De plus les niveaux vibratoires relevés en tête de pieu sont sensiblement moins élevés que ceux mesurés lors de la campagne de diagnostic initial (de l'ordre de 5 à 10 dB(A) au global).

Ceci peut s'expliquer :

- par la dispersion intrinsèque au protocole de mesure vibratoire utilisé ;
- et par le fait que les opérations de terrassement ayant été effectués entre temps, le décaissé par rapport à l'altitude des voies a augmenté, et que la paroi de pieux sécants réalisée modifie également localement les conditions de propagation des ondes vibratoires dans le sol.



Fig. 10 : Vues des capteurs de vibration sur la murette de rehausse de la paroi pieux sécants, et en tête de pieu

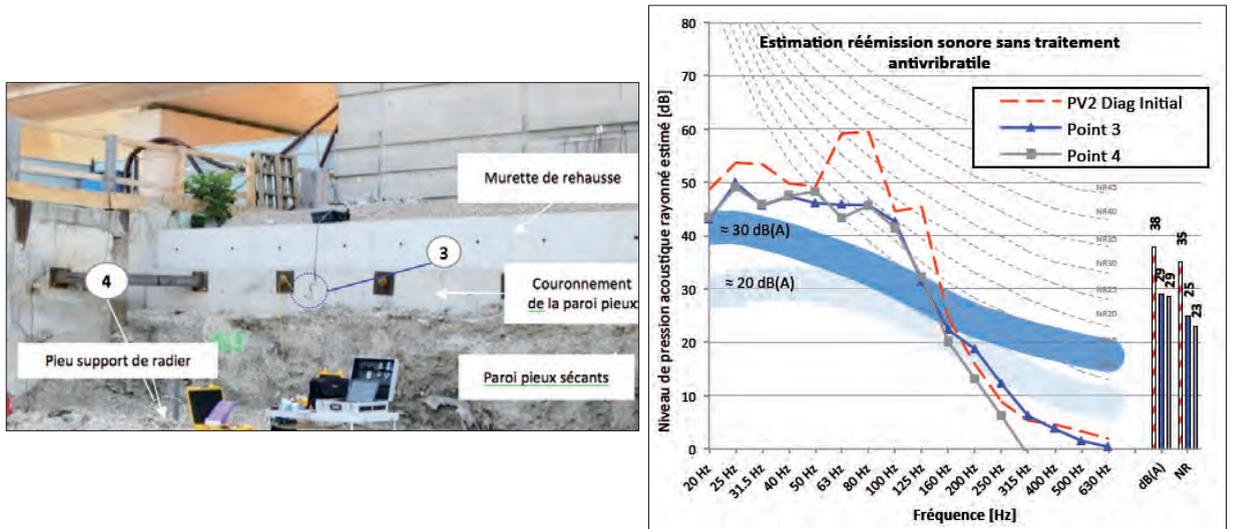


Fig. 11 : Photographie de points de mesure et comparaison des niveaux sonores rayonnés estimés sur la base des nouvelles mesures sur tête de pieu par rapport au diagnostic initial dans le terrain

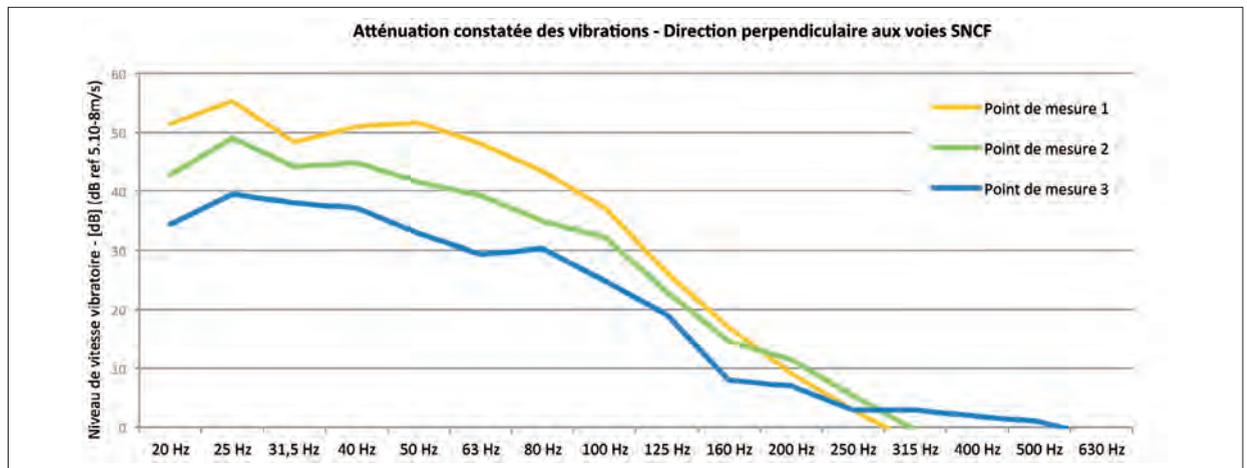


Fig. 12 : Atténuation globale apportée par le système [sol autocompactant - matelas résilient - voile BA]

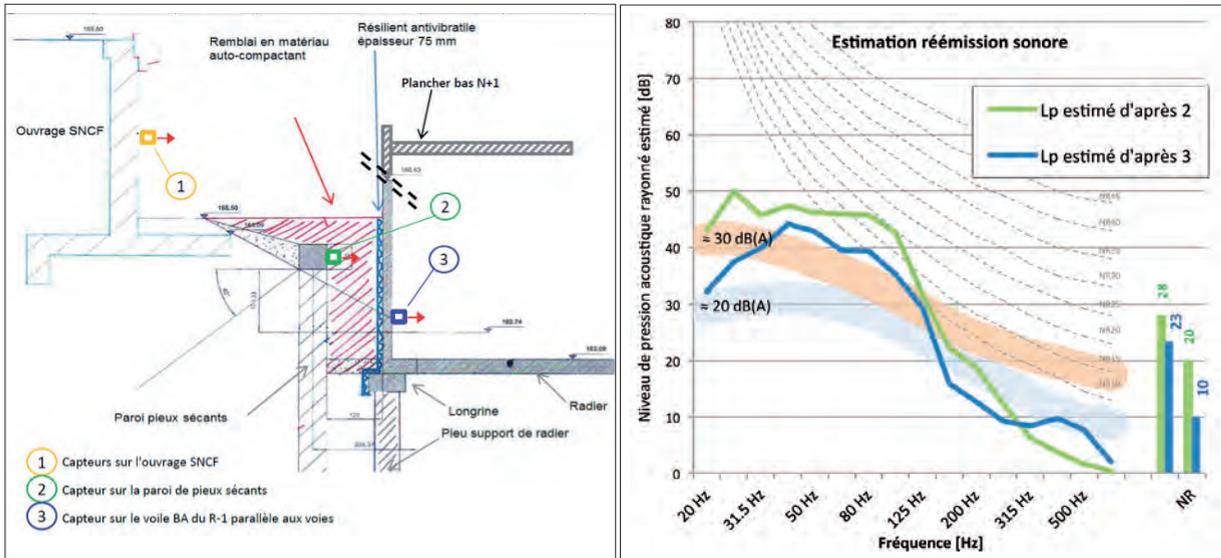


Fig. 13 : Estimation finale des niveaux sonores rayonnés avant et après traitement antivibratile



Fig. 14 : Vues de la mise en œuvre du matelas résilient

Mesures finales sur radier

Une fois les travaux de fondation terminés, et les travaux de gros œuvre largement avancés, des mesures vibratoires finales ont été réalisées pour qualifier les performances du système de coupure verticale. L'efficacité du système [remblai auto-compactant / matelas résilient / voile béton du sous-sol] a été estimée sur la base des mesures réalisées sur la paroi pieux sécants au cours de la session de mesure n°2, et sur les mesures réalisées sur le radier et les voiles béton du sous-sol au cours de la session de mesure n°3. Selon les fréquences, des atténuations de l'ordre de 5 à 10 dB ont pu être ainsi constatées dans la direction perpendiculaire aux voies (direction de sollicitation vibratoire prépondérante). L'atténuation des vibrations constatée selon l'axe vertical est nulle, cependant les sollicitations vibratoires selon cet axe étaient inférieures d'environ 10 dB et sont donc *in fine* comparables à celles selon l'axe horizontal perpendiculaire aux voies.

Au global, ces atténuations vibratoires ont permis un gain prévisible sur les niveaux sonores réémis estimés de l'ordre de 5 à 6 dB(A), et de l'ordre de 5 à 10 dB par bandes de tiers d'octave.

Le niveau sonore final estimé au passage d'un train après traitement par coupure verticale est de l'ordre de 20 à 25 dB(A), avec un maximum d'énergie acoustique contenue dans les bandes de tiers d'octave centrées sur 20 à 100 Hz.