

# Évaluation et modélisation de la propagation vibratoire dans plusieurs immeubles d'habitation

## Cas particulier du remplacement d'un appareil de voie

**Guillaume Coquel, Corinne Fillol**  
RATP  
Délégation générale à l'innovation  
et au développement durable  
54, quai de la Rapée  
75990 Paris CEDEX 12  
E-mail : guillaume.coquel@ratp.fr  
corinne.fillol@ratp.fr

### Résumé

La procédure de traitement des plaintes liées aux bruits et vibrations générés par les matériels roulants ferrés de la RATP est présentée. A titre d'exemple, le cas particulier d'un appareil de voie en tunnel provoquant des vibrations dans les bâtiments est présenté. Des mesures réalisées avant et après son remplacement sont détaillées. Les mesures sont comparées à une approche simplifiée de propagation vibratoire dans les structures.

### Abstract

RATP procedure to handle complains about noise and vibrations from rolling stocks is presented. As an example, a case of vibrations in building caused by points and crossing in tunnel is presented. Measurements performed before and after its replacement are analyzed. These measures are compared to a simplified approach dedicated to vibration propagation in buildings.

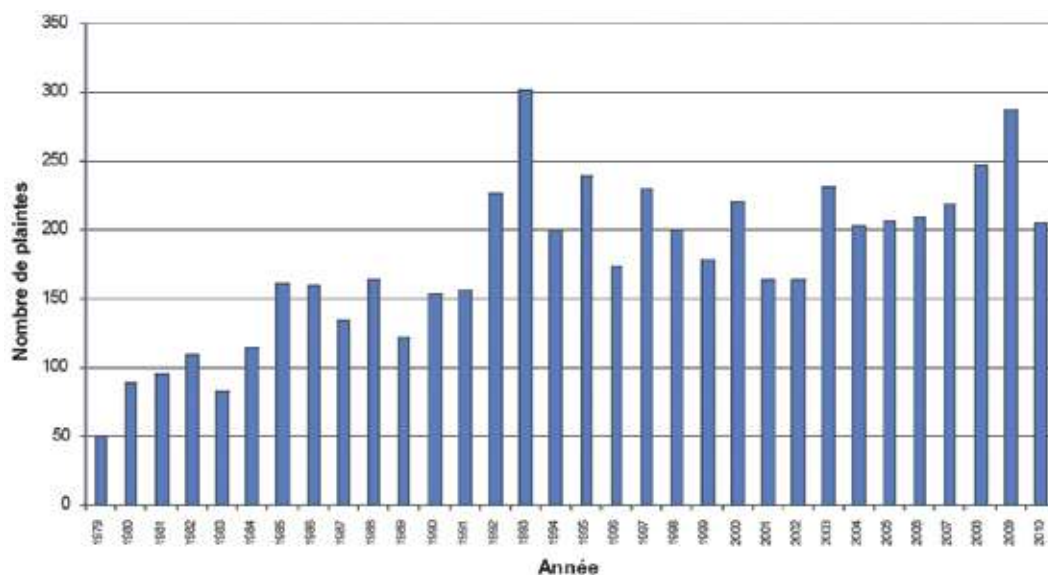


Fig. 1 : Évolution du nombre de plaintes reçues par la RATP concernant le réseau ferré

### Contexte

La RATP répond chaque année à un grand nombre de plaintes de riverains (figure 1). Marginal, dans les années 60/70, un accroissement significatif est apparu dans les années 80/90. Cette augmentation n'a pas pour origine une dégradation importante de la qualité des infrastructures mais, elle traduit plutôt la variation de la sensibilité des riverains (multi-exposition, cumul des niveaux au cours d'une journée, effet socio-culturel, dégradation du cadre de vie, etc).

Ce constat qualitatif est, de plus, renforcé par le fait que les gabarits-enveloppes des niveaux vibratoires (mini-maxi) et de bruits réémis, relevés depuis une quarantaine d'années dans les appartements des riverains habitant le long des voies RATP, présentent un écart important de plus de 30 dB qui illustre bien le caractère subjectif de la plainte et la nature diverse des conditions environnementales en urbain dense (nature du bâti, fondations, cavités, etc). Les plaintes ne résultent donc pas d'un dépassement d'un seuil limite admissible, scientifiquement établi, mais de l'aggravation d'une situation «jugée jusque-là supportable» par le riverain.

L'analyse multi-critère de la nature des plaintes permet d'identifier que 95% de celles-ci révèlent une anomalie de la voie et conduisent à une opération de meulage qui supprime la cause d'aggravation de la situation jugée «jusqu'à supportable» par le plaignant. Les 5% restants font l'objet de mesures, au domicile, permettant de juger de la gravité de la situation en comparant les valeurs relevées aux gabarits-enveloppes pré-cités.

Elle montre aussi qu'en moyenne 45% des plaintes sont relatives aux lignes de RER, 54% au métro et 1% au tramway [1] ; leur répartition étant fortement corrélée à la nature du réseau à savoir 86% des plaintes d'origine solidienne émanent du métro et 36% des plaintes d'origine aérienne du RER. La première cause de déclenchement d'une plainte, tous modes confondus, est l'usure ondulatoire de la table de roulement du rail. Viennent ensuite les chocs sur des joints et le passage d'appareil de voie puis tout problème lié au bruit de roulement hors défaut signalé ci-contre.

Une attention particulière est donc apportée, par la RATP, à chaque réclamation qui entraîne systématiquement une enquête technique, une réponse personnalisée (objectif de délai de réponse : 21 jours) et des travaux si nécessaire. Outre le meulage préventif et l'initiative de la RATP d'installer systématiquement, depuis quelques années, un tapis anti-vibratoire sous le ballast quand celui-ci est remplacé, des plaintes de riverains subsistent pour lesquelles les solutions classiques de résorption ne sont pas assez pertinentes. La RATP s'est donc impliquée dans plusieurs programmes de recherche (CONVURT [2], TURNOUT, thèse CIFRE en partenariat avec le CSTB ou RIVAS pour les plus récents) pour appréhender toute la chaîne de propagation vibratoire comprenant le tunnel ou la plateforme de tramway, la transmission dans le sol, le couplage sol-structure, la propagation dans le bâtiment ainsi que le rayonnement acoustique dans les appartements afin d'optimiser en termes technique et économique les solutions curatives et dorénavant préventives lors de la construction d'infrastructures nouvelles.

Ainsi, cet article synthétise dans le cas particulier du remplacement d'un appareil de voie sur une ligne de RER, la méthodologie utilisée par la RATP (mesures, modèle hybride, etc) pour évaluer l'impact de son remplacement dans divers immeubles riverains en termes de vibration et de propagation du bruit solidien.

### Caractérisation du site expérimental et description d'une approche théorique de calcul de propagation dans la structure

Suite à de nombreuses plaintes de riverains au droit d'un appareil de voie mettant en évidence, outre des meulages préventifs semestriels et des nettoyages manuels, des réémissions solidiennes différemment perçues selon le positionnement des bâtiments riverains, des étages, des interactions avec les réseaux de conduits souterrains, etc, la RATP a entrepris plusieurs campagnes de mesurages (avant/après meulage, étude structure de fondations, identification de liaisons rigides, avant/après remplacement d'appareils de voie, etc) dans 6 logements de 4 bâtiments différents.

Seules les mesures réalisées avant et après le remplacement d'un appareil de voie au droit des plus proches riverains sont présentées dans cet article (figure 2). Ainsi, chaque campagne de mesurage comprenait des mesures vibratoires en tunnel et au pied des bâtiments ainsi que des mesures acoustiques et vibratoires dans les appartements.

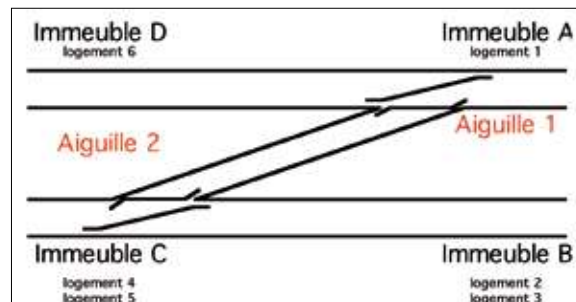


Fig. 2 : Position des immeubles et des logements par rapport à l'appareil de voie

Dans le tunnel, les mesures ont été réalisées, systématiquement, en continu, durant une semaine et par déclenchement sur seuil. Les points de mesures étaient positionnés à 2 m du cœur de l'appareil de voie. Trois accéléromètres ont été positionnés pour la direction transversale sur le champignon du rail, pour la direction verticale sous le patin du rail et pour la direction radiale sur le piedroit du tunnel (figure 3).

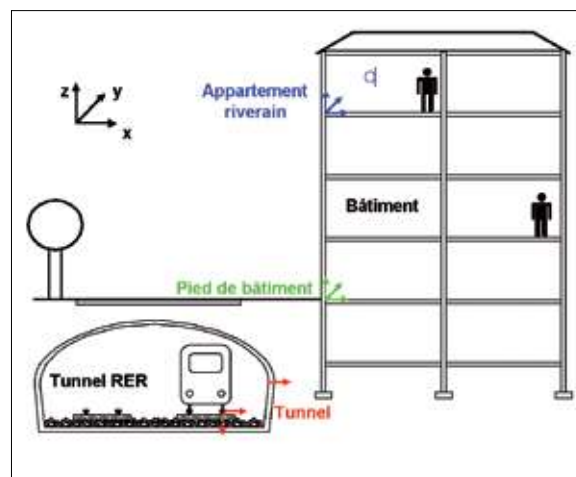


Fig. 3 : Configuration des points de mesure

Au pied de l'immeuble et chez les riverains, les mesures de vibrations ont été réalisées en trois axes au droit d'un élément porteur, complétées chez le riverain, par un point acoustique placé à 1,6 m de hauteur, au tiers de la diagonale de la pièce.

Le protocole utilisé pour cette campagne de mesures a permis de calculer les atténuations vibratoires dans la structure des bâtiments visés par le remplacement de l'appareil de voie.

Dans la perspective de prédire les niveaux vibratoires dans la structure des bâtiments, une approche analytique présentée par Hassan [3] reposant sur une modélisation des vibrations dans les éléments porteurs par ondes et sur la diffusion d'énergie dans les planchers à chaque étage a été programmée en langage Scilab [4].

Cette méthode est très rapide (15 s de 1 à 1 150 Hz) et permet de prendre en compte un nombre important d'étages (testée jusqu'à 50 étages).

## Comparaison modélisation-mesures *in situ* après remplacement de l'appareil de voie

### Gain à la source

D'une manière générale, les mesures dans le tunnel ont montré une très bonne stabilité de la source vibratoire avant et après le remplacement de l'appareil de voie puisque les écart-types sur les niveaux d'accéléérations mesurés dans le tunnel varient de 0,5 à 2,0 dB en fonction de la direction (vitesse de circulation, cycle de maintenance des rames).

Une atténuation nette des vibrations horizontales et verticales sur le rail de -5 à -15 dB après le changement de l'appareil de voie est aussi mesurée entre 31,5 et 1 600 Hz (figure 4).

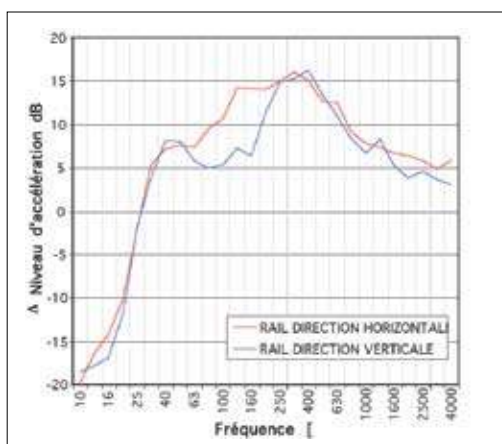


Fig. 4 : Différences de niveaux mesurés sur le rail avant et après remplacement de l'appareil de voie

### Gain au pied des bâtiments

La figure 5 illustre l'atténuation de 5 à 15 dB répercutée au pied du bâtiment entre 20 et 100 Hz quel que soit l'immeuble. L'amplification des vibrations dans la gamme 125-160 Hz pour l'immeuble D est due à la faible émergence des vibrations après le changement de l'appareil de voie dans cette gamme de fréquence. Au vu de ces résultats, l'efficacité prévisible du remplacement de l'appareil de voie est vérifiée.

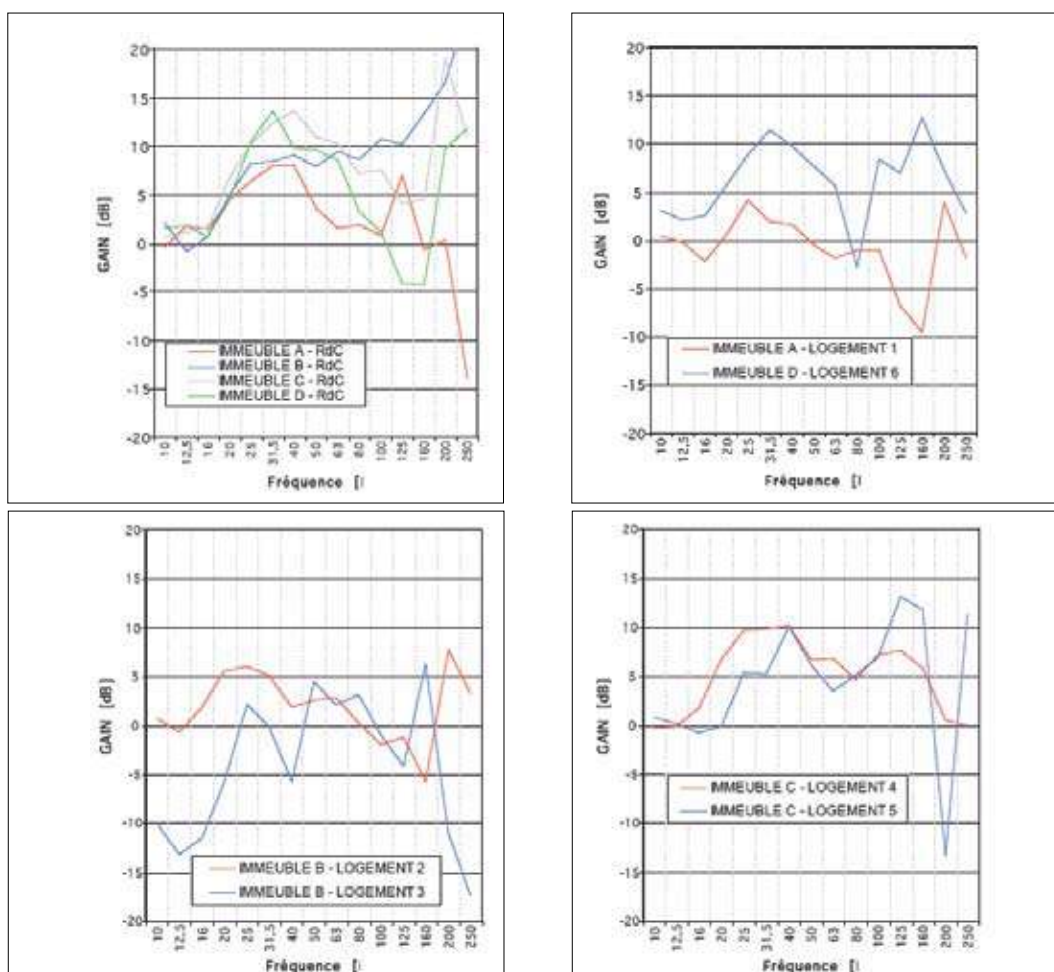


Fig. 5 : Gain en termes de niveaux de vitesse vibratoire mesurée au pied de bâti et dans les logements dans les quatre immeubles

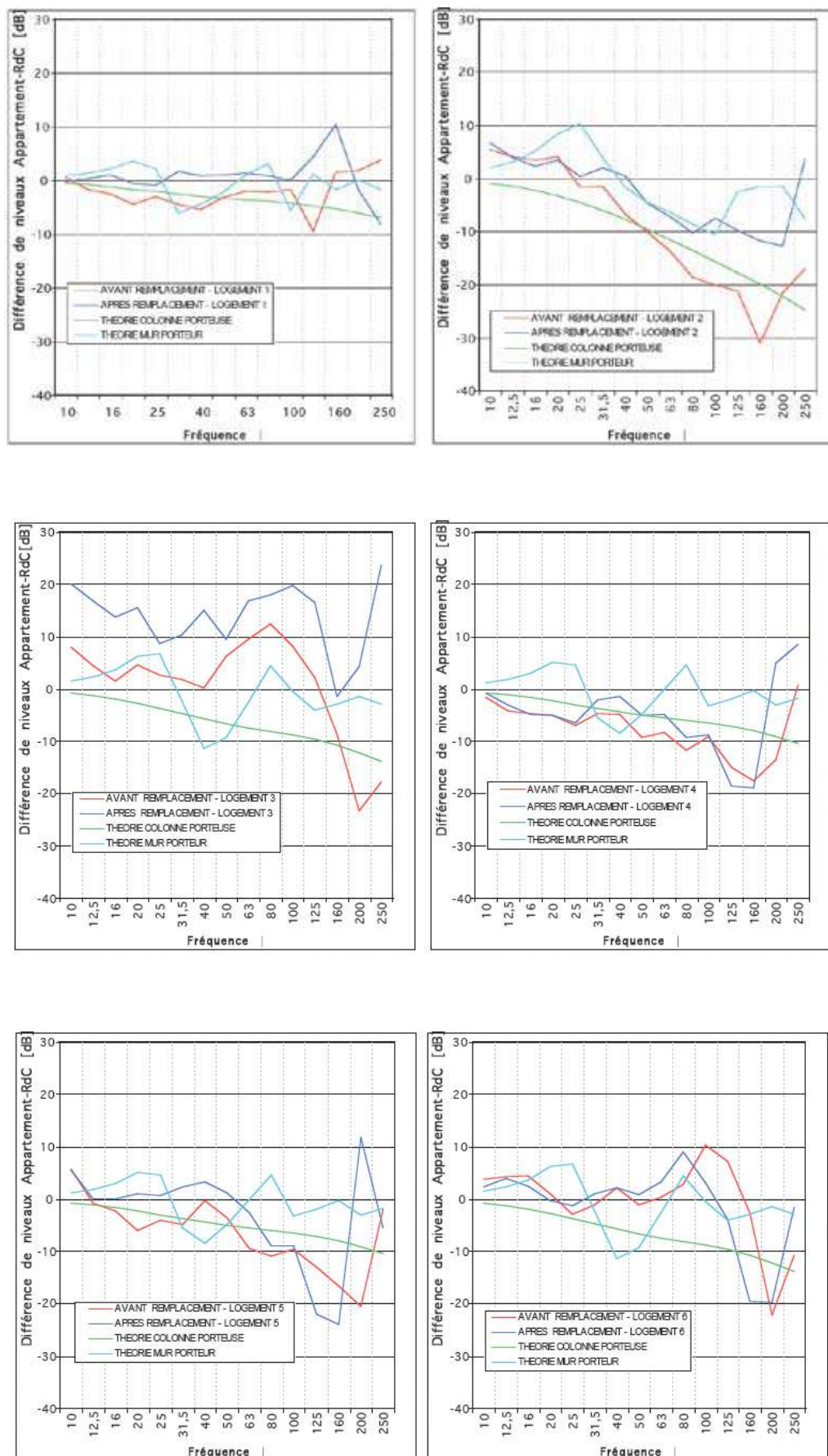


Fig. 6 : Propagation vibratoire dans les immeubles. Différence avant emplacement, après remplacement et modèle théorique sur murs porteurs puis colonnes porteuses.

| Propriétés Physiques         |                   | Modèle murs |       | Modèle Colonne |          |       |
|------------------------------|-------------------|-------------|-------|----------------|----------|-------|
| Dénomination                 | Unité             | murs        | sol   | colonne        | plancher | sol   |
| Module d'Young               | Mpa               | 28 000      | 50    |                | 12 000   | 50    |
| Coefficient de Poisson       | -                 | 0,2         | 0,25  |                | 0,1      | 0,25  |
| Masse volumique              | kg/m <sup>3</sup> | 2 400       | 1 500 |                | 610      | 1 500 |
| Pertes apparentes            | -                 | 0,02        |       |                | 0,02     |       |
| Hauteur d'un étage           | m                 | 3           |       |                | 3        |       |
| Épaisseur des murs/planchers | m                 | 0,2         |       |                | 0,15     |       |
| Diamètre de la colonne       | m                 |             |       | 0,16           |          |       |
| Longueur de l'immeuble       | m                 |             | 30    |                |          |       |

Tabl. 1 : Propriétés physiques des matériaux utilisés dans les modèles [5]

### Validation de l'approche simplifiée de propagation dans les bâtiments

Il a donc été possible de calculer l'atténuation vibratoire dans la structure des bâtiments à partir des vibrations mesurées au rez-de-chaussée. Cette atténuation a été comparée à une méthode de calcul basée sur l'approche simplifiée décrite plus haut.

Les propriétés des matériaux utilisés dans le code de calcul sont présentées dans le tableau 1. Les immeubles modélisés ont tous 7 étages (plus un sous-sol). Ils ont été modélisés à chaque fois soit en prenant l'hypothèse de colonnes porteuses (bâtiment Haussmannien), soit en prenant l'hypothèse de murs porteurs (structure de béton). Dans le cas de l'immeuble à murs porteurs, les voiles de béton et les planchers sont constitués de béton et ont la même épaisseur. Dans le cas des colonnes porteuses, le plancher est supposé léger. Dans les deux cas, le sol reprend les propriétés classiques d'un sol souple.

La figure 6 ci-contre montre que les fonctions de transfert sont différentes lorsqu'elles sont mesurées avant et après le changement de l'appareil de voie. Cependant, malgré ces différences d'amplitudes, les enveloppes des courbes sont semblables. Le modèle de colonnes porteuses semble toujours surestimer l'atténuation dans la structure du bâtiment. Au contraire, le modèle de propagation sur murs porteurs donne des résultats plus cohérents. Loin de refléter la réalité de la propagation réelle dans le bâtiment, il permet d'estimer l'ordre de grandeur de la décroissance des vibrations se propageant dans un élément vertical du bâtiment.

D'après la figure 6 et le tableau 2, l'approche simplifiée donne des résultats cohérents en termes de fonctions de transfert dans les bâtiments. Les tendances sont respectées même si des comportements modaux prévus par le code n'apparaissent pas sur les mesures. Bien que cette variation soit observée, les niveaux globaux mesurés et calculés avant et après le remplacement de l'appareil de voie sont évalués dans une plage de 0 à 5 dB, excepté le logement 3 pour lequel les fonctions de transfert mesurées avant et après le remplacement de l'appareil de voie ne sont pas semblables en termes d'amplitude. Cette différence n'a pas pu être expliquée malgré une vérification de tous les paramètres métrologiques.

Pour statuer sur les premières tendances, il est à noter que les deux approches sont systématiquement calculées lorsque les typologies et les caractéristiques précises des bâtiments ne sont clairement identifiées avant l'utilisation de codes plus complexes.

|            | AVANT REMPLACEMENT |          | APRÈS REMPLACEMENT |          |
|------------|--------------------|----------|--------------------|----------|
|            | MURS               | COLONNES | MURS               | COLONNES |
| Logement 1 | 2,5                | 0,7      | 1,5                | 4,3      |
| Logement 2 | 8,6                | 2,6      | 4,8                | 6,1      |
| Logement 3 | 6,6                | 13,4     | 13,4               | 20,1     |
| Logement 4 | 4,9                | 1,8      | 1,8                | 2,3      |
| Logement 5 | 2,0                | 1,2      | 3,3                | 7,3      |
| Logement 6 | 1,7                | 4,7      | 0,1                | 6,9      |

Tabl. 2 : Ecarts entre gains globaux mesurés et calculés par les deux méthodes de calcul pour chacun des logements

### Gain dans les logements

Les mesures dans les logements sont également présentées sur la figure 5, page 7. Elles montrent que l'atténuation est plus importante pour les immeubles C et D (tous deux situés à proximité de l'aiguille 2) que pour l'immeuble A. Ce constat est conservé sur les mesures de bruit solidien (Figure 7).

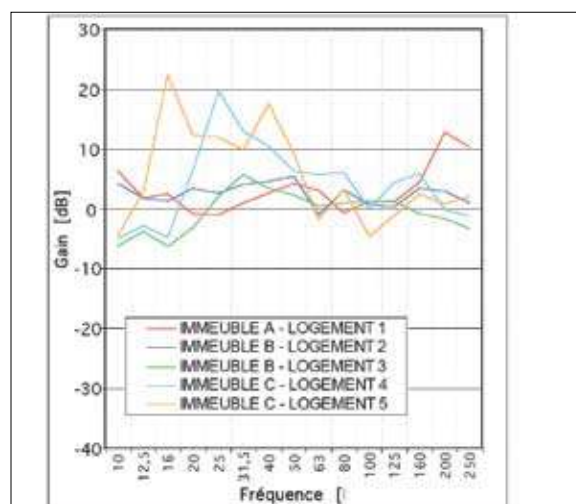


Fig. 7 : Gain acoustique dans les logements suite au remplacement de l'appareil de voie

| Immeuble | Logement | Grandeur   | Proximité aiguille 1 |            | Proximité aiguille 2 |            |
|----------|----------|------------|----------------------|------------|----------------------|------------|
|          |          |            | Immeuble A           | Immeuble B | Immeuble C           | Immeuble D |
| A        | 1        | Vibration  | 0,0                  |            |                      |            |
|          |          | Acoustique | 2,0                  |            |                      |            |
| B        | 2        | Vibration  |                      | 4,0        |                      |            |
|          |          | Acoustique |                      | 4,0        |                      |            |
|          | 3        | Vibration  |                      | 1,5        |                      |            |
|          |          | Acoustique |                      | 2,0        |                      |            |
| C        | 4        | Vibration  |                      |            | 9,0                  |            |
|          |          | Acoustique |                      |            | 12,0                 |            |
|          | 5        | Vibration  |                      |            | 7,0                  |            |
|          |          | Acoustique |                      |            | 11,5                 |            |
| D        | 6        | Vibration  |                      |            |                      | 9,0        |
|          |          | Acoustique |                      |            |                      | ?          |

Tabl. 3 : Gains en termes de pression acoustique et de vitesse vibratoire globale [dB] dans chacun des logements étudiés

Pour synthétiser, le tableau 3 récapitule les atténuations globales mesurées dans les divers logements. Il montre que tous les logements ont bénéficié d'une réduction acoustique ou vibratoire. Dans le cas de l'immeuble A, il est difficile de se prononcer sur la relation de cause à effet entre le changement de l'appareil de voie et la réduction des nuisances car l'efficacité vibratoire est égale à 0 en valeur globale. Pour les autres logements, la réduction acoustique ne suit pas une loi proportionnelle avec la réduction vibratoire.

## Références bibliographiques

- [1] RATP / CML, «Les statistiques annuelles », 2010
- [2] <http://www-g.eng.cam.ac.uk/convurt/>
- [3] HAassan O. A. B., Train-Induced Groundborne Vibration and Noise in Buildings, Multi-Science Publishing Co. Ltd. 2006
- [4] Scilab 5.3.0 - Logiciel libre et gratuit diffusé sous Licence CeCILL et développé par le Consortium Scilab - Digiteo. <http://www.scilab.org>
- [5] Lesueur C., Rayonnement acoustique des structures. Eyrolles 1988.

## Conclusion

Les premières pierres ont été posées par le développement en interne d'outils de prédiction à temps de calcul réduit, capable, par exemple d'évaluer la propagation vibratoire dans un bâtiment ou prédire les modes propres de locaux d'habitation et de calculer les niveaux de bruits réémis. Ces outils constituent un moyen idéal d'expérimentation et de sensibilisation de la maîtrise d'ouvrage, des architectes ou des concepteurs. Cependant, pour des cas complexes, comprenant des sources éloignées, des caractéristiques de sols mal connues, des interactions avec des conduites souterraines ou autres liaisons rigides, etc, la RATP poursuit ses efforts dans le développement de modèles mixtes permettant des approches macro (péri-mètre d'un quartier) et des approches micro (un bâtiment et quelques dizaines de mètre autour), mais aussi dans la constitution de bases de données sur la propagation vibratoire en sols complexes et en interaction sol/structure. De même, la RATP travaille sur l'amélioration des méthodes de caractérisation des sols ainsi que du bâtiment par des méthodes passives qui pourraient permettre d'obtenir des propriétés vibratoires plus précises en évitant les méthodes intrusives.