CNRC · NRC

Solution constructive nº 39

La vibration des bâtiments sous l'effet de la circulation

par Osama Hunaidi

Cet article décrit la nature et les causes des vibrations dues à la circulation, dans les bâtiments; on y étudie les mesures correctrices et préventives qui peuvent être prises. L'accent est mis sur les maisons.

Les vibrations constituent souvent un problème, dans les bâtiments. Les sources internes courantes sont les machines, les systèmes de CVC, les ascenseurs et les activités des occupants. Parmi les sources externes se trouvent les tremblements de terre, le vent, le dynamitage et les activités de construction, ainsi que la circulation routière ou ferroviaire. Cet article ne porte que sur les vibrations causées par la circulation routière.

Les vibrations dues à la circulation routière constituent un sujet de préoccupation courant dans les villes du Canada ou d'autres pays. Les propriétaires de maisons peuvent se plaindre du désagrément ou des dommages qu'elles causent. Il y a aussi le risque d'effets néfastes des vibrations, à long terme, sur les bâtiments historiques, en particulier ceux qui sont fragiles. Les vibrations peuvent aussi nuire aux activités sensibles, par exemple celles qui se déroulent dans les blocs opératoires des hôpitaux, dans les laboratoires de recherche scientifique et dans les secteurs de technologie de pointe.

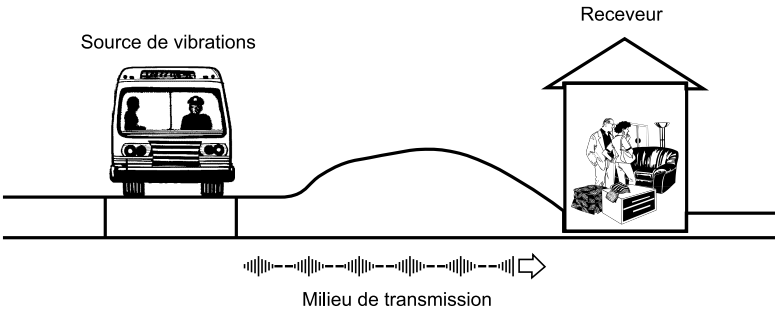

Figure 1. Les vibrations dues à la circulation peuvent être caractérisées par un scénario source-trajet-receveur.

Comment la circulation produit des vibrations

Comme la plupart des vibrations, celles qui sont dues à la circulation peuvent être caractérisées par un scénario source-trajet-receveur. Le contact des véhicules avec les irrégularités de la chaussée (p. ex. les nids de poule, les fissures et les tampons de regard non au niveau de la rue) exerce des charges dynamiques sur la chaussée. Ces charges donnent lieu à des ondes de

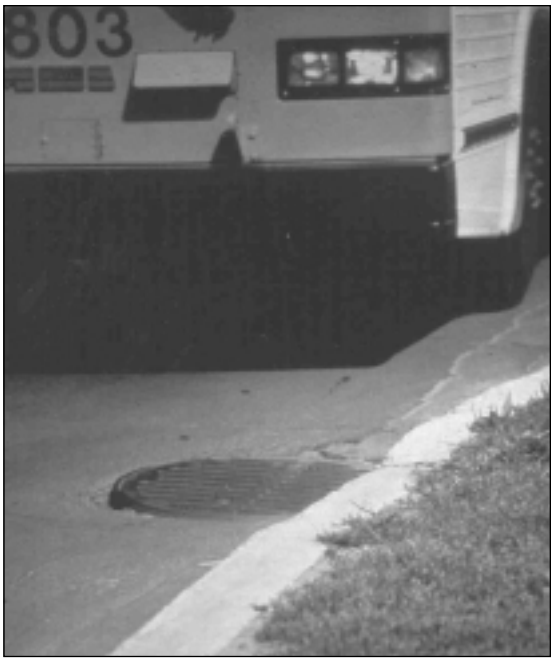

Figure 2. Un autobus ou un camion qui passe sur une irrégularité de la chaussée produit des vibrations.

construction

Publié par
Institut de recherche en construction
IRC

*Tableau 1. Comparaison des niveaux de vibration (mm/sec², valeur efficace) produits par un autobus et un camion, pour montrer l'effet de différents types de suspension à différentes vitesses**

Endroit	25 km/h		50 km/h	
	Autobus	Camion	Autobus	Camion
Terrain devant la maison	20,5	19,9	64,5	33,2
Mur extérieur de fondation	11,2	10,1	30,9	15,7
Au milieu du plancher du 1er étage	20,3	20,8	62,9	30,1
Au milieu du plancher du 2e étage	35,0	37,3	96,2	46,7

* L'autobus avait une suspension pneumatique, tandis que celle du camion était du type ressorts d'acier à lames.

contrainte qui se propagent dans le sol et finissent par atteindre les fondations des bâtiments adjacents en les faisant vibrer. Les vibrations dues à la circulation sont surtout causées par les véhicules lourds comme les autobus et les camions. Les voitures et les camions légers provoquent rarement des vibrations qui peuvent être ressenties dans les bâtiments.

Lorsqu'un autobus ou un camion passe sur une irrégularité de la chaussée, il produit une charge d'impact, ainsi qu'une charge d'oscillation due au piochage subséquent du véhicule. La charge d'impact crée dans le sol des vibrations qui sont dominantes aux fréquences propres de vibration du sol, tandis que le piochage donne lieu à des vibrations à la fréquence de celui-ci (une caractéristique de la suspension du véhicule). Si les fréquences propres du sol coïncident avec l'une ou l'autre des fréquences propres de la structure ou des constituants du bâtiment, il y a résonance et les vibrations sont amplifiées.

Contrairement aux irrégularités comme les tampons de regard ou les nids de poule, le mauvais état de la chaussée produit des charges dynamiques qui s'exercent continuellement sur celle-ci. Si les inégalités de la chaussée comportent une composante harmonique qui, à la vitesse indiquée sur le panneau, mène à une fréquence d'excitation coïncidant avec l'une ou l'autre des fréquences propres du véhicule et/ou du sol, il peut en résulter une vibration importante. Ce phénomène (dit « de la planche à laver ») est bien connu des conducteurs roulant sur des chemins non macadamisés ou des routes en gravier qui présentent des ondulations. À une vitesse donnée, le véhicule vibre beaucoup mais le trépidation diminue si le conducteur accélère ou ralentit.

Facteurs influant sur le niveau et la fréquence de vibration

La circulation routière produit généralement des vibrations dont les fréquences se situent principalement dans la plage 5-25 Hz (oscillations par seconde). L'amplitude des vibrations, mesurée en accélération, varie entre 0,005 et 2 m/s² (0,0005 et 0,2 g); mesurée en vitesse, elle est comprise entre 0,05 et 25 mm/s. Les fréquences dominantes et l'amplitude de la vibration dépendent de bien des facteurs : état de la chaussée, poids, vitesse et suspension du véhicule, type et stratification du sol, période de l'année, distance par rapport à la route, type de bâtiment. Les effets de ces facteurs sont interdépendants et il est difficile d'établir des relations simples entre eux.

Par exemple, l'effet de la vitesse du véhicule dépend de l'état de la chaussée. De manière générale, plus la route est en mauvais état, plus la vitesse influe sur l'amplitude des vibrations. L'influence du type de suspension dépend aussi de la vitesse du véhicule et de l'état de la chaussée. À basse vitesse et sur une route à surface égale, l'effet du type de suspension est négligeable. Mais à grande vitesse et sur une chaussée en mauvais état, le type de suspension joue un rôle important. Cette interdépendance est illustrée au tableau 1, qui indique les niveaux de vibration relevés dans le cas d'un autobus urbain et d'un camion appartenant à la même catégorie de poids et roulant sur une route inégale. Les niveaux de vibration produits par les deux véhicules étaient semblables à 25 km/h. À 50 km/h, cependant, la vibration causée par l'autobus était environ deux fois plus forte que celle produite par le camion[1].

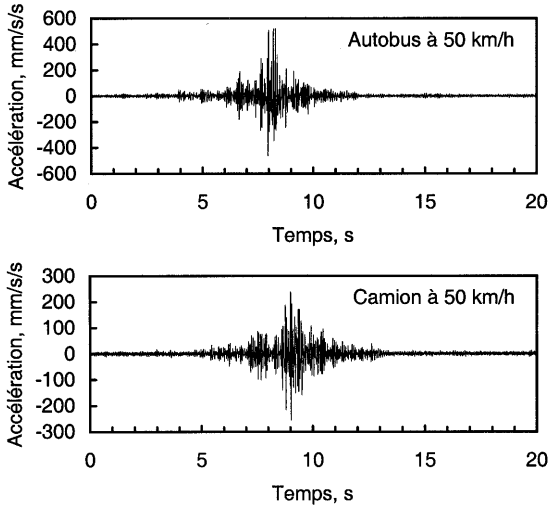

Figure 3. Comparaison des niveaux de vibration produits par un autobus urbain et un camion. On observe une grande différence due aux types de suspension différents.

Le type de sol et sa stratification influent grandement sur l'amplitude des vibrations et les fréquences dominantes. Moins le sol est rigide et a un pouvoir amortissant, plus la vibration est forte. Dans le cas des charges d'impact, les vibrations du sol atteignent leur niveau le plus élevé aux fréquences propres du site. C'est à ces fréquences que le sol – et les systèmes structuraux en général – offre le moins de résistance et réagit le plus aux charges. Les fréquences propres de vibration des sols dépendent de la rigidité et de la stratification de ceux-ci. De manière générale, les vibrations dues à la circulation sont plus fortes dans les zones comportant, entre 7 et 15 m de profondeur, une couche d'argile plastique. Les fréquences propres du sol peuvent alors coïncider avec celles des maisons et de leurs planchers, ce qui produit de la résonance ou amplifie les vibrations.

Au Canada et dans les autres pays septentrionaux, où la terre végétale est habituellement gelée, en hiver, les niveaux de vibration peuvent alors être plus de deux fois moins élevés que le reste de l'année. De façon générale, il y a moins de plaintes concernant les vibrations, en hiver. C'est au moment du dégel qu'on enregistre le plus de plaintes. On croit généralement que l'intensification des vibrations est attribuable au niveau phréatique, qui est plus élevé à ce moment-là; cependant, les mesures réalisées montrent que les niveaux de vibration, au printemps, ne sont que légèrement plus élevés qu'à l'automne et en été. Il semble que la période hivernale plus paisible fait que les occupants des maisons oublient temporairement les vibrations, ce qui abaisse leur seuil de tolérance lorsque les niveaux de vibration augmentent, au printemps.

Les niveaux de vibration diminuent avec la distance par rapport à la route par suite de la « propagation géométrique » de l'énergie vibratoire et de sa dissipation par la viscosité du sol et/ou le frottement dans le sol. La propagation géométrique est le phénomène qui a lieu lorsque les ondulations produites par le lancement d'une pierre dans un étang s'estompent en s'élargissant. Dans le cas des sols homogènes, les schémas de propagation des vibrations sont simples et on peut établir des rapports simples entre les niveaux de vibration et la distance. Cependant, de façon générale, les sols sont rarement homogènes, et ils sont habituellement stratifiés. Les schémas de propagation sont par conséquent très complexes et les relations d'atténuation sont propres à chaque site.

Les vibrations aériennes

Le bruit produit par les autobus et camions qui passent peut aussi provoquer des vibrations, en particulier si les habitations se trouvent près de la route. Ces vibrations aériennes, qui surviennent à des fréquences plus élevées que les vibrations au niveau du sol, causent surtout un frémissement des fenêtres et des objets non fixés, dans les pièces en façade.

Mesure et analyse des vibrations

Si l'on veut bien évaluer l'effet de la vibration des bâtiments sous l'action de la circulation, il faut qu'il n'y ait pas de distorsion sur le plan des vibrations mesurées, et le traitement et l'analyse des données doivent se faire selon des modes opératoires établis[2]. L'appareillage de mesure des signaux vibratoires, qui comprend habituellement des capteurs de vibrations, des conditionneurs de signaux et du matériel d'enregistrement, devrait avoir une résolution et une sensibilité suffisantes. Les mesures devraient être réalisées à des endroits où les niveaux de vibration reflètent le but de l'évaluation. Pour déterminer l'effet des vibrations sur le plan du désagrément, il faut effectuer les mesures à l'endroit où la vibration est la plus forte, normalement au centre du plancher. Dans le cas des planchers en bois, il faudrait le faire près des solives afin d'éviter la résonance locale des différents panneaux.

Pour évaluer l'effet des vibrations sur un bâtiment, il faudrait normalement réaliser les mesures sur les fondations ou sur la partie du terrain située devant le bâtiment. Les capteurs de vibrations devraient être installés de façon à mesurer exactement le mouvement effectif du sol ou des composants du bâtiment dans la gamme de fréquences intéressante. Si l'on soupçonne que les modalités d'installation ont pour effet de causer une distorsion des vibrations, il faut procéder autrement.

Le degré de détail nécessaire lors de l'analyse des signaux vibratoires dépend de la nature et de l'objet de l'étude. Dans le cas d'une évaluation préliminaire, on peut se contenter de trouver la valeur de crête du signal vibratoire et de déterminer la fréquence dominante de vibration en comptant le nombre de crêtes négatives et de crêtes positives dans un intervalle de temps donné. Pour effectuer une évaluation approfondie, il faut recourir à des méthodes d'analyse poussée, par exemple l'analyse en fréquence par tiers d'octave, la pondération en fréquence selon des courbes établies de réponse des individus, ou l'analyse spectrale.

Effet des vibrations sur les gens

La vibration des bâtiments sous l'effet de la circulation routière ne met pas en jeu la santé ni la sécurité des occupants, mais elle constitue plutôt un désagrément pour eux. Les vibrations peuvent être jugées inacceptables par les occupants en raison des sensations physiques gênantes qui en résultent, de la perturbation des activités comme le sommeil et la conversation, du frémissement des vitres et des objets non fixés, ainsi que des risques d'endommagement des bâtiments ou de leur contenu. L'expérience a montré que les occupants des maisons sont portés à se plaindre si les niveaux de vibration ne se situent que légèrement au-dessus du seuil de perception, leur principal sujet de préoccupation étant l'endommagement possible des bâtiments ou de leur contenu. Le niveau de tolérance varie considérablement d'une personne à l'autre et d'une région à l'autre.

L'Organisation internationale de normalisation et plusieurs pays (le Canada n'en faisant pas partie) ont publié des normes indiquant comment évaluer la réponse des individus à la vibration des bâtiments. Les normes portent surtout sur les vibrations continues ou intermittentes comme celles produites par les machines et l'enfoncement de pieux de fondation, ainsi que sur les vibrations impulsionnelles comme celles produites par le dynamitage. Elles n'indiquent pas clairement comment évaluer les vibrations causées par les autobus et les camions, lesquelles ont une durée relativement courte et possèdent des caractéristiques d'amplitude complexes. Des chercheurs de l'IRC ont récemment mis au point des méthodes d'évaluation des vibrations dues à la circulation en se basant sur toute une série de mesures effectuées à plusieurs endroits suite à des plaintes[3].

Risques d'endommagement des bâtiments

Il se peut que les propriétaires de maisons se plaignent des dommages résultant des vibrations dues à la circulation : fissures dans les murs, les plafonds ou les fondations, séparation de la maçonnerie, etc. Cependant, même s'ils peuvent contribuer au processus de dégradation attribuable à d'autres causes, les niveaux de vibration sont rarement assez élevés pour être directement à l'origine de ces dommages. Les composants du bâtiment sont habituellement soumis à des déformations résiduelles par suite du mouvement inégal du sol, des cycles d'humidité et de température, du manque d'entretien, ou bien de travaux de rénovation ou de réparation passés. Les faibles niveaux de vibration produits par la circulation routière peuvent donc s'ajouter aux déformations résiduelles pour déclencher les dommages. Comme il est difficile de définir un niveau de vibration qui peut occasionner des dommages à un bâtiment, on comprend pourquoi cette question demeure controversée. Dans certains cas, lorsqu'un bâtiment est soumis à des vibrations pendant de nombreuses années, il peut y avoir endommagement sous l'effet de la fatigue (c.-à-d. de la mise en charge répétée) si les contraintes s'exerçant sur le bâtiment sont assez fortes. Outre les dommages causés directement par les vibrations, des dommages indirects peuvent résulter des mouvements différentiels provoqués par le tassement du sol dû à la densification. Les sols constitués de sable meuble sont particulièrement susceptibles de se densifier lorsqu'ils sont soumis à des vibrations.

Plusieurs pays ont adopté des normes permettant d'évaluer l'effet des vibrations sur les bâtiments. Il n'existe pas de normes nationales de ce genre au Canada, mais certaines provinces ont défini des valeurs indicatives visant les vibrations causées par le dynamitage. La valeur indicative la plus sévère indiquée dans les normes publiées

Normes concernant l'évaluation de la réponse des individus aux niveaux de vibration

- ISO 2631/2 (1989), Organisation internationale de normalisation
- ISO 8041 (1990), Organisation internationale de normalisation
- BS 6472 (1984), British Standards Institution
- ANSI S3.29 (1983), American National Standards Institute

Normes concernant l'évaluation des risques d'endommagement des bâtiments

- DIN 4150 (1984), Deutsches Institut fuer Normung
- SN 640 312 (1978), Association of Swiss Highway Engineers
- BD 7385 (1993), British Standards Institution
- Rapport nº 8507 (1980), U.S. Bureau of Mines (vibrations produites par le dynamitage)
- Publication nº NPC-119 (1978), ministère de l'Environnement de l'Ontario (vibrations produites par le dynamitage)
- ISO 4866 (1990), Organisation internationale de normalisation

concernant l'endommagement des maisons par les vibrations correspond à plus de trente fois le seuil de perception humaine. Les occupants trouveraient donc extrêmement gênantes, en raison de leur niveau très élevé, les vibrations qui pourraient causer des dommages. Lors d'une récente étude sur les vibrations produites par les autobus dans des maisons de certaines rues de Montréal – les propriétaires s'étant plaints du désagrément qui en résultait –, l'IRC a constaté que les niveaux de vibration étaient beaucoup moins élevés que la valeur indicative la plus sévère[1].

Solutions proposées et stratégies de prévention

Voici les solutions et les stratégies de prévention que l'on a proposées pour rendre les niveaux de vibration acceptables : entretien périodique de la chaussée, régulation du débit de circulation et de la vitesse, rigidification de la structure des routes, amélioration du sol, distance suffisante entre les routes et les bâtiments, blocage des vibrations à l'aide de barrières construites dans le sol, systèmes d'isolation des bâtiments. Certaines de ces mesures se sont révélées efficaces.

L'entretien de la chaussée (mise à niveau des tampons de regard, réparation des nids de poule, nouveau revêtement) constitue la méthode la plus économique et efficace. Cependant, il s'agit habituellement d'une mesure à court terme; par exemple, les fissures et autres défauts de l'ancienne chaussée réapparaissent dans le revêtement. Il se peut donc que l'on doive entretenir les routes de manière plus suivie qu'il ne serait normalement nécessaire pour assurer le confort des automobilistes et veiller à la sécurité et à l'apparence. Cela n'est pas toujours possible en raison des coûts élevés qui en résultent. Même si elles constituent des mesures correctrices efficaces, la réduction des vitesses limites et l'imposition de restrictions aux véhicules lourds sont ordinairement difficiles à mettre en application.

L'expérimentation et l'analyse théorique révèlent que l'amélioration de la structure de la route par accroissement de l'épaisseur et de la rigidité ne permet pas de réduire efficacement les niveaux de vibration dans la plage des fréquences dominantes des vibrations dues à la circulation. Par ailleurs, l'amélioration de la structure du sol constituant l'assise des routes, par exemple grâce à la méthode du malaxage profond, pourrait réduire ces niveaux de vibration.

Augmenter la distance entre les routes et les maisons pourrait constituer une

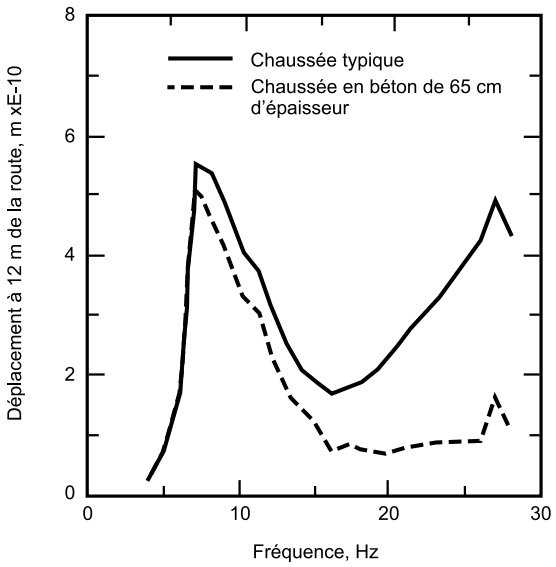

Figure 4. Effet de la modification de la rigidité de la chaussée sur les niveaux de vibration. La rigidification de la structure de la route ne réduit pas sensiblement les niveaux de vibration aux fréquences (8 à 15 Hz) qui influent le plus sur les maisons.

Les barrières souterraines pour bloquer les vibrations

Les études montrent que pour réduire sensiblement (c'est-à-dire habituellement de 0,25) les niveaux de vibration, une barrière souterraine destinée à bloquer les vibrations doit avoir une profondeur au moins égale à une longueur d'onde de Rayleigh. Dans le cas des vibrations dues à la circulation, qui se situent surtout dans la gamme des basses fréquences, il faudrait des barrières très profondes (de plus de 10 m).

Les ondes de Rayleigh

Les ondes de Rayleigh, qui constituent le principal vecteur des vibrations dues à la circulation, sont limitées à une région située près de la surface du sol et ayant une profondeur approximative d'une longueur d'onde. Le mouvement du sol provoqué par ces ondes a une composante horizontale et une composante verticale, qui diminuent avec la profondeur. Les ondes de Rayleigh qui sont produites de manière ponctuelle à la surface du sol, p. ex. par un véhicule qui passe sur un nid de poule, ont un front cylindrique et sont donc atténuées beaucoup plus lentement que les ondes équivolumiques et de compression, dont le front est hémisphérique.

Mécanismes d'atténuation des vibrations du sol

- Propagation géométrique
  $A_2 = A_1 (r_1 / r_2)^n$
  $n = 1/2$ dans le cas des ondes de surface
  $n = 1$ dans le cas des ondes de volume
- Amortissement par le milieu (frottement dans le sol)
  $A_2 = A_1 \exp [\alpha (r_2 - r_1)]$

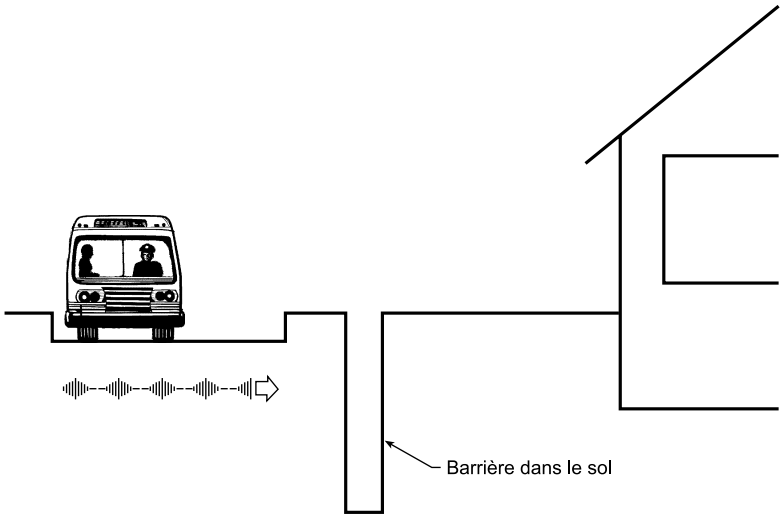

Figure 5. Illustration schématique d'une barrière construite dans le sol pour bloquer les vibrations

stratégie de planification urbaine pratique. Lorsque les vibrations sont provoquées par le passage des véhicules sur un nid de poule ou une fissure, et compte tenu seulement de la propagation géométrique, les niveaux de vibration pourraient être réduits au moins du tiers par doublage de la distance, si le sol est homogène. La relation d'atténuation est la plupart du temps propre à chaque site; il faut donc la définir *in situ* pour déterminer la distance nécessaire.

Les barrières construites dans le sol sont des tranchées qui sont soit laissées ouvertes, soit remplies avec un matériau (par exemple de la bentonite ou du béton) dont la raideur ou la masse volumique diffère notablement de celle du sol environnant. Ces barrières pourraient être efficaces, car les vibrations dues à la circulation sont transmises principalement par le sol sous forme d'ondes de Rayleigh, qui se propagent près de la surface du sol. Il se peut toutefois que les tranchées soient trop coûteuses dans le cas des maisons. Elles pourraient peut-être se justifier dans le cas d'immeubles soumis à des limites de vibration strictes, par exemple les hôpitaux – à cause des blocs opératoires – ou les usines des secteurs de pointe utilisant des procédés sensibles.

Une autre option, plus économique, qui pourrait être employée dans un secteur résidentiel pourrait être la construction d'une rangée de colonnes de chaux ou de ciment sous la partie de l'emprise adjacente à la route. Ces colonnes sont réalisées *in situ* par malaxage mécanique du sol avec de la chaux vive ou du ciment ordinaire. Les colonnes pourraient avoir un diamètre de 0,5 à 1 m et une profondeur de 15 m. La capacité de ce type de paroi faite de colonnes à réduire les vibrations dues à la circulation n'a pas encore été démontrée.

L'utilisation de systèmes d'isolation des bâtiments, par exemple le montage sur ressorts, n'est pas une bonne solution en raison de la nature des vibrations produites par la circulation routière, qui se situent principalement dans la plage des basses fréquences. Contrairement aux immeubles à étages, pour lesquels on a employé avec succès des systèmes d'isolation pour réduire les vibrations provenant des stations de métro, les maisons types n'ont pas la masse nécessaire pour provoquer des déformations suffisantes dans les matériaux d'isolation. Les coûts de mise en place de systèmes d'isolation sous les bâtiments existants sont prohibitifs.

Résumé

Les propriétaires de maisons sont susceptibles de se plaindre des vibrations dues à la circulation si leurs niveaux ne sont que légèrement au-dessus du seuil de perception, leur principal sujet de préoccupation étant les dommages qui peuvent être causés aux bâtiments. Il se peut que cette dernière éventualité se produise, mais il est peu probable que ce soit uniquement en raison des vibrations. Il pourrait être difficile et coûteux de réduire les vibrations à un niveau acceptable. Dans le cas des bâtiments existants, la mesure correctrice la plus pratique est l'entretien des routes. Dans le cas des nouveaux lotissements, les moyens efficaces pourraient comprendre l'augmentation de la distance entre les maisons et les rues, l'amélioration de la structure du sol, et la construction, à une certaine profondeur, de barrières faites de colonnes.

Références

1. Hunaidi, O., et Tremblay, M. « Traffic-induced building vibrations in Montréal », *Revue canadienne de génie civil*, v. 24, n° 5, 1997, p. 736-753.
2. Hunaidi, O., Rainer, J.H., et Pernica, G. Measurement and analysis of traffic-induced vibrations, *Compte rendu du 2e Symposium international sur le bruit et les vibrations dus au transport*, Saint-Pétersbourg, Russie, 1994, p. 103-108.
3. Hunaidi, O. « Evaluation of human response to building vibration caused by transit buses », *Journal of Low Frequency Noise and Vibration*, v. 15, n° 1, 1996, p. 25-42.

***Osama Hunaidi, Ph.D.**, est agent de recherche supérieur au sein du programme Réhabilitation des infrastructures urbaines, à l'Institut de recherche en construction du Conseil national de recherches.*

© 2000
Conseil national de recherches du Canada
Juin 2000
ISSN 1206-1239

« Solutions constructives » est une collection d'articles techniques renfermant de l'information pratique issue de récents travaux de recherche en construction.

Pour obtenir de plus amples renseignements, communiquer avec l'Institut de recherche en construction, Conseil national de recherches du Canada, Ottawa K1A 0R6. Téléphone : (613) 993-2607; télécopieur : (613) 952-7673; Internet : http://irc.nrc-cnrc.gc.ca