

Référence : FR01T19A18-T-IDP3-MT-GE00-0005-B



RÉSEAU STRUCTURANT DE TRANSPORT EN COMMUN MANDAT 10.2 : ÉTUDE VIBRATOIRE



MÉMOIRE TECHNIQUE – RAPPORT ÉTUDE ACOUSTIQUE

Mandat 10.2 : Étude vibration

IDENTIFICATION DU DOCUMENT	
N° du document SYSTRA Canada	FR01T19A18-T-IDP3-MT-GE00-0005-B
N° du document client	N/A

Rév.	Date	Modification	Préparé par	Révisé par	Approuvé par
A	2019-10-17	Rédaction initiale	PR	EA/WW	EL
B	2019-11-18	Mise à jour et résultats	PR/CF	EA	EL

Préparé par :

Pierre Ropars, ing.
Ingénieur – Bruit et vibrations

Signature

Walide Wasmine
Chargé d'étude – Conformité, bruit et vibrations

Signature

Révisé par :

Eric Augis
Responsable – Acoustique et vibrations

Signature

Didier Rancourt
Spécialiste – Études environnementales

Signature

Éric Le Hir
Responsable - Transport urbain

Signature

Approuvé par :

Romain Taillandier, ing.
Responsable - Transport urbain

Signature



TABLE DES MATIÈRES

1.	SOMMAIRE EXÉCUTIF	1
2.	INTRODUCTION	9
2.1	CONTEXTE DE L'ÉTUDE	9
2.2	OBJECTIFS DE L'ÉTUDE	10
2.3	CONTENU DU RAPPORT	11
3.	DESCRIPTION DES PHÉNOMÈNES	12
3.1	DÉFINITIONS ET NOTIONS DE VIBRATIONS	12
3.2	MÉCANISMES DE TRANSMISSION DES VIBRATIONS	15
4.	CRITÈRES D'IMPACT VIBRATOIRE	17
4.1	INDICATEURS DE GÊNE DES RIVERAINS ET VALEURS CIBLES	17
4.2	SEUILS DE SENSIBILITÉ D'APPAREILS SENSIBLES	18
5.	MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE	21
6.	ANALYSE DE LA SENSIBILITÉ DU MILIEU	23
6.1	ANALYSE GÉNÉRALE	23
6.2	DÉFINITION DES SITES REPRÉSENTATIFS ET DES TRONÇONS HOMOGÈNES ASSOCIÉS	23
6.3	ANALYSE DES SITES TRÈS SENSIBLES	24
6.4	CHOIX DES SITES D'ÉTUDES ET TRONÇONS HOMOGÈNES ASSOCIÉS	36
7.	ANALYSE DU RISQUE D'IMPACT EN EXPLOITATION POUR LES SECTIONS EN SURFACE	38
7.1	MÉTHODES ET HYPOTHÈSES DE MODÉLISATION	38
7.2	ESSAIS DE CARACTÉRISATION SUR SITE	42
7.3	CARACTÉRISATION DE LA RÉPONSE VIBRATOIRE DES BÂTIMENTS	48
7.4	RÉSULTATS ET IMPACT POUR LES SECTIONS EN SURFACE	51
7.5	ANALYSE ET CONCLUSION DES NIVEAUX VIBRATOIRES ESTIMÉS SANS MITIGATION	52
8.	MESURES DE MITIGATION DES VIBRATIONS	53
8.1	DÉFINITION DE SOLUTIONS DE MITIGATION APPROPRIÉES	53
8.2	RÉSULTATS DE SIMULATIONS AVEC PRISE EN COMPTE DES MESURES DE MITIGATION	55
8.3	CONCLUSION SUR LES IMPACTS RÉSIDUELS APRÈS TRAITEMENT	58
9.	DÉMARCHE DE CONTRÔLE DES RISQUES D'IMPACT VIBRATOIRE	59
9.1	DÉMARCHES POUR LES SECTEURS EN SOUTERRAIN	59
9.2	DÉMARCHE POUR LES SITES SPÉCIFIQUEMENT SENSIBLES	61

10. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	63
11. RÉFÉRENCES	64

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Valeurs maximales recommandées de vitesse vibratoire ($L_{Vmax,S}$) et de bruit solidien ($L_{pAmax,S}$) à l'intérieur des bâtiments pour des événements fréquents, selon recommandations de FTA [1]	18
Tableau 2 : Application et interprétation des courbes génériques VC (Vibration Criterion) recommandées pour les équipements sensibles	19
Tableau 3 : Synthèse des estimations préliminaires de la sensibilité des sites spécifiquement sensibles	35
Tableau 4 : Zones d'exposition homogène et sites représentatifs associés	36
Tableau 5 : Synthèse des niveaux des niveaux de bruits solidiens estimés sans moyen de mitigation sur le tracé du tramway de la ville de Québec.....	51
Tableau 6 : Synthèse du risque d'impact résiduel et pose de voie anti-vibratile préconisée	55
Tableau 7 : Synthèse des niveaux des niveaux de bruits solidiens estimés sans moyen de mitigation sur le tracé du tramway de la ville de Québec.....	65
Tableau 8 : Synthèse du risque d'impact résiduel et pose de voie anti-vibratile préconisée	66

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Vue générale du tracé de la ligne de tramway dans la ville de Québec.....	10
Figure 2 : Quantités utilisées pour caractériser un mouvement vibratoire	12
Figure 3 : Exemple de signal d'accélération vibratoire mesuré sur une traverse de la voie ferrée	14
Figure 4 : Exemple de signal de vitesse vibratoire mesuré sur la plateforme en béton	14
Figure 5 : Transmission des vibrations et bruits solidiens d'origine ferroviaire.....	16
Figure 6 : Transmission des vibrations et bruits solidiens d'origine ferroviaire.....	16
Figure 7 : Courbes génériques VC (Vibration Criterion) préconisées pour les équipements sensibles	20
Figure 8 : Grand Théâtre de Québec.....	26
Figure 9 : Palais Montcalm.....	27
Figure 10 : Salle du Diamant.....	28
Figure 11 : Salle du Capitole.....	29
Figure 12 : Équipements spécifiquement sensibles présents dans les locaux de l'université	30
Figure 13 : Équipements spécifiquement sensibles présents dans les locaux du CHU-L.....	32
Figure 14 : Équipements spécifiquement sensibles présents dans les locaux de l'INRS.....	33
Figure 15 : Équipements spécifiquement sensibles présents dans les locaux de l'Hôpital Saint-François d'Assise ...	34
Figure 16 : Principe de la modélisation	38
Figure 17 : Résultats intermédiaires de la campagne de mesure de niveau d'excitation.....	40
Figure 18 : Photos de la configuration de la campagne d'essais de caractérisation de l'excitation, Lyon,	41
Figure 19 : Spectre densité de force appliqué sur le radier de voie pour une rame selon [1].....	41



Figure 20 : Illustration des moyens d'essais utilisés lors de la campagne de mesures	43
Figure 21 : Représentation de la source linéique et des mobilités de transfert ponctuelles associées	44
Figure 22 : Configuration des essais de décroissance dans le sol	44
Figure 23 : Exemple de décroissance dans le sol calculée à partir des essais effectués sur le site 3.....	45
Figure 24 : Position des emplacements de mesure de décroissance dans le sol effectuée lors de la campagne d'essais	46
Figure 25 : Mobilités linéiques FT1 calculées à 12 m (bas)	46
Figure 26 : Variabilité des mobilités de transfert linéiques selon le secteur considéré.....	47
Figure 27 : Configuration des essais de mesure des fonctions de transfert sol/bâtiment	48
Figure 28 : Fonctions de transfert sol/bâtiment (FT2, FT3 et FTb) mesurées pour plusieurs bâtiments de type 1....	49
Figure 29 - Fonctions de transfert sol/bâtiment (FT2, FT3 et FTb) mesurées pour plusieurs bâtiments de type 2....	50
Figure 30 : Schéma de principe des moyens de mitigation usuels	53
Figure 31 : Pertes par insertion calculées pour trois types de pose de voie couramment utilisés pour du tramway.	54
Figure 32 : Linéaire de pose de voie anti vibratile nécessaire à l'évitement de risque d'impact vibratoire	57
Figure 33 : Exemple de résultat de modélisation 2D½ (FEM-BEM)	60
Figure 34 : Étapes d'une modélisation numérique approfondie	60

1. SOMMAIRE EXÉCUTIF

Une étude visant à analyser l'impact vibratoire du projet de la future ligne de tramway urbain de la Ville de Québec, en phase d'exploitation, a été réalisée par la société SYSTRA.

Les vibrations générées par le passage des rames de tramway sont susceptibles d'occasionner des nuisances chez les riverains. Ces vibrations sont la conséquence de forces dynamiques agissant au contact du rail et des roues (1). Elles se transmettent à la plateforme de la voie ferrée, puis au sol et se propagent dans le sol avec des longueurs d'onde et une atténuation en fonction de la distance qui dépend du sol considéré et de la fréquence d'excitation (2). Plusieurs types d'ondes sont générés dans le sol, qui excitent ensuite les fondations des bâtiments situés à proximité et se transmettent à l'ensemble de la structure de ces bâtiments (3), produisant alors, des vibrations, et par rayonnement acoustique, un bruit sourd qualifié de bruit solidien (4).

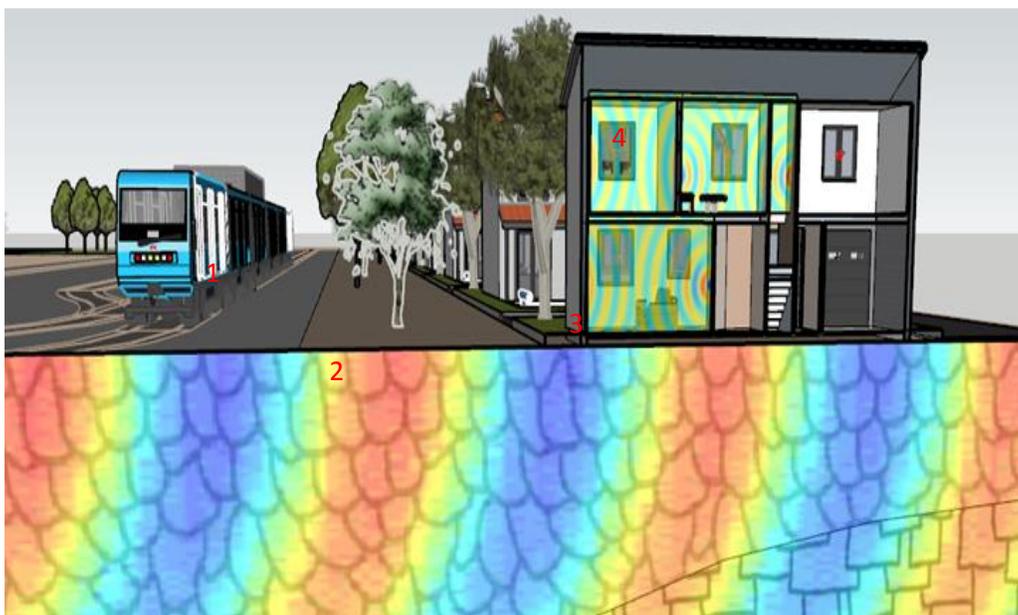


Schéma de principe de propagation des vibrations ferroviaires dans l'environnement

L'impact peut se traduire par un sentiment de gêne des occupants des bâtiments riverains, lié à la perception tactile des vibrations du plancher des bâtiments ou à la perception du bruit solidien. Dans le cas de sites à proximité du projet avec des appareils de haute précision, l'enjeu principal est un risque de perturbation du fonctionnement de ces équipements.

Ce rapport présente la méthodologie employée pour analyser ces risques sur les sites exposés aux vibrations du tramway, sélectionnés pour l'étude, ainsi que les résultats obtenus à ce jour de l'évaluation de l'impact vibratoire du tramway.

Il est important de noter qu'outre l'analyse des risques d'impact lié aux vibrations émises par l'exploitation de la future ligne de tramway, comme attendu par le ministère de l'Environnement et de la Lutte contre

les changements climatiques (MELCC), cette étude permettra de déterminer les exigences à respecter par le futur consortium chargé des études détaillées et de la construction (CCFE), pour maîtriser ces risques d'impact en intégrant les mesures de mitigation nécessaires dans la conception, et en prévoyant le dispositif de qualification et validation de ces mesures.

1.1. DÉFINITION DES CRITÈRES D'ACCEPTATION

Il n'existe pas au Québec, ni au Canada, de texte réglementaire directement applicable pour l'évaluation et la limitation de l'exposition des riverains aux vibrations et bruits solidiens émis par l'exploitation d'une nouvelle infrastructure de transport ferroviaire.

Il a été convenu d'appliquer la méthodologie et les valeurs cibles recommandées par le guide « FTA » publié par la *Federal Transit Administration* (Réf. : *Transit Noise and Vibration Impact Assessment*, 2018). Les objectifs définis dans ce guide de référence sont adaptés au cas de l'insertion urbaine d'une infrastructure nouvelle comme la future ligne de tramway de Québec. Les valeurs cibles exprimées en niveau de vitesse vibratoire (en dB_V ou VdB) et de bruit solidien (en dB_A) tiennent compte de la sensibilité des activités dans les bâtiments exposés.

Une attention particulière est portée aux sites dont les équipements ou activités sont spécifiquement sensibles aux vibrations ou aux bruits solidiens. Il s'agit en général d'établissements de santé (hôpitaux, cliniques, laboratoires médicaux), de laboratoires de recherche, mais aussi de salles de spectacle, de studios d'enregistrement, etc. Pour ces établissements, les critères d'acceptation sont plus sévères que ceux considérés pour les bâtiments d'usage courant (logements, hôtels, écoles, bureaux, etc.). Les seuils à ne pas dépasser sont définis en se basant sur les courbes critères « VC » définis par l'ASHRAE dans le guide « *Practical Guide to Noise and Vibration Control for HVAC Systems* ».

1.2. MÉTHODOLOGIE D'ÉTUDE

Dans ce rapport, la problématique à traiter et la méthodologie d'étude mise en œuvre dépendent des secteurs et des cas spécifiques rencontrés. L'étude aborde séparément les trois cas suivants :

- Cas des bâtiments de sensibilité courante dans les secteurs proches de la ligne en surface;
- Cas des bâtiments de sensibilité courante dans les secteurs proches de la ligne en souterrain;
- Cas des sites avec des équipements ou activités très sensibles aux vibrations et/ou aux bruits solidiens.

Dans le cas de *bâtiments courants proches de la ligne en surface* (1), une étude complète a été réalisée basée sur des modélisations, accompagnées d'essais sur site à Québec, menés durant deux semaines au cours du mois de juillet 2019. L'étude comporte les étapes suivantes :

- Définition des sites d'étude (modélisations et/ou essais sur site) après une phase de délimitation de sections homogènes en termes de sensibilité et d'exposition aux vibrations, et sélection d'un ou plusieurs bâtiments, de sensibilité courante représentative, représentatifs de chaque section homogène;

- Réalisation des essais sur site, pour la caractérisation des fonctions de transfert vibratoire dans le sol, et entre le sol et la structure du bâtiment. Ces essais ont été réalisés en juillet 2019 sur un total de 22 sites environ;
- Calcul des niveaux de vibrations et de bruit solidien à l'intérieur des bâtiments sélectionnés, en utilisant les grandeurs mesurées sur site, en étape 2;
- Analyse du risque d'impact dans les bâtiments par comparaison des niveaux de vibration et de bruit solidiens calculés avec les valeurs limites fixées;
- Définition de mesures de mitigation des vibrations applicables dans les secteurs où les niveaux de vibration et de bruit solidien sont en excès des valeurs limites;
- Reprise des calculs avec prise en compte de l'effet des mesures de mitigation et analyse des impacts résiduels.

Dans le cas de *bâtiments courants proches de la ligne en souterrain (2)*, une première analyse de sensibilité des bâtiments dans les secteurs concernés a été réalisée, conduisant à la sélection de bâtiments représentatifs à étudier. En revanche, il n'a pas été possible de réaliser à ce jour, des essais vibratoires sur site, comme pour les bâtiments étudiés le long des sections de ligne en surface. En effet, ce type d'essais pour la section en tunnel nécessitent de réaliser des sondages géotechniques pour pouvoir caractériser les propriétés dynamiques/vibratoires du sol (essais Cross Hole accompagnés d'essais de mesure des transferts vibratoires depuis le fond du forage jusqu'en surface). De tels essais ainsi que les modélisations associées seront réalisés en phase d'ingénierie détaillée, sur la base de prescriptions techniques précises.

Dans le cas de *bâtiments de sensibilité particulière (3)*, le travail réalisé a comporté les étapes suivantes :

- Visite des sites très sensibles en présence d'un représentant du site, afin de collecter l'information nécessaire à une première évaluation du niveau de risque d'impact : le type et la classe de précision des équipements les plus sensibles, leur localisation vis-à-vis du tracé, et la présence ou non de dispositifs anti-vibratiles sous ou à l'intérieur des équipements, l'identification d'éventuelles sources vibratoires parasites, sensibilité des locaux au bruit solidien, etc. Ces visites se sont déroulées entre le 22 juillet et le 2 août 2019, et ont concerné au total neuf sites.
- Évaluation du seuil de sensibilité des appareils ou activités sensibles concernés.
- Proposition d'une démarche d'étude de détail (modélisations et essais), à réaliser en phase d'ingénierie de détails.

De manière générale, les études vibratoires pour les sites à fort enjeu (2) et (3) requièrent des moyens conséquents et la connaissance de paramètres non accessibles à ce stade du projet. Ces études seront à la charge du consortium chargé de la réalisation de la ligne de tramway.

1.3. SENSIBILITÉ AUX VIBRATIONS DES DIFFÉRENTS SECTEURS ET DE SITES PARTICULIERS

Le projet s'insère à proximité de plusieurs sites particulièrement sensibles aux vibrations ou aux bruits solidiens. Les sites comportant des appareils sensibles susceptibles d'être impactés par le tramway sont l'Université Laval, le CHU de Québec Université Laval (CHUL), le GMFU Laurier, l'INRS, et l'Hôpital Saint-François d'Assise.



Sur le site de l'Université Laval, deux laboratoires comportent des microscopes AFM et MEB, mais les locaux sont situés respectivement à 110 m et 150 m du tracé. À ces distances, les vibrations générées par le tramway auront été atténuées par le sol, et seront alors nettement en dessous du niveau vibratoire ambiant dans les laboratoires. Le risque d'impact est donc très faible sur ce site. Il n'existe pas d'équipement avec une grande sensibilité sur le site du GMFU Laurier. Le risque d'impact sur le CHUL est jugé modéré en raison de la présence d'équipements assez sensibles dans la salle d'angiographie située à 40 m du tracé. Le risque d'impact est jugé fort sur le site de l'INRS, qui comporte un microscope très sensible dans un local à seulement 35 m du tracé. Le site de l'Hôpital Saint-François d'Assise présente également un risque d'impact important, non pas sur les appareils sensibles, car situés à plus de 100 m du tracé, mais dans le local d'audiométrie où un faible niveau de bruit de fond est exigé.

Les autres sites à sensibilité particulière sont des salles de concert ou spectacle et des studios musicaux : le Grand Théâtre de Québec, dont le Studio 29 est le local le plus exposé (à 35 m du tracé), la salle Raoul-Jobin du Palais Montcalm et Le Diamant (toutes deux situées à environ 40 m), et Le Capitole (situé à l'arrière du Diamant à environ 50 m).

En dehors des sites de sensibilité particulière, mentionnés précédemment, les bâtiments d'usage courant (logement, hôtels, écoles, églises, bureaux, administrations, etc.) présents le long du tracé présentent, a priori, un risque d'impact faible à modéré, en raison principalement d'une distance assez grande entre les bâtiments et le tracé de la ligne (souvent supérieure à 15 m) sauf dans les rues suivantes : le chemin des Quatre-Bourgeois (distance d'environ 13 m), le boulevard René-Levesque (distance d'environ 12 m), la rue de la Croix-Rouge et la 1^{re} Avenue (distance d'environ 7-8 m).

La ligne de tramway longe un nombre important de maisons individuelles et de petits immeubles résidentiels de construction assez semblable : la partie basse de ces bâtiments est généralement en maçonnerie; la structure des étages supérieurs peut être quant à elle en bois. Cette configuration n'apparaît pas favorable en termes de comportement vibratoire. Pour cette raison, il est prévu de caractériser par des essais sur site le comportement vibratoire de plusieurs bâtiments de ce type.

1.4. MODÉLISATIONS ET ESSAIS, CAS DES BÂTIMENTS COURANTS PRÈS DE LA LIGNE EN SURFACE

Pour les sites de sensibilité courante (logements, hôtels, écoles, bureaux) le long du tracé en surface, des simulations des niveaux de vibration du plancher et de bruit solidiens dans les bâtiments ont été réalisées à l'aide d'un modèle de calcul. Le modèle comporte plusieurs termes : l'excitation (1), la fonction de propagation vibratoire dans le sol (2), la fonction de transfert vibratoire entre le sol et le plancher des bâtiments (3), la fonction de transfert entre la vibration du plancher. Les termes (2) et (3) étant naturellement très dépendants du type de sol et de bâtiments, il a été décidé de les déterminer lors d'essais sur site exécuté en juillet 2019. La prise en compte des comportements spécifiques de sols et des constructions à Québec est un moyen de maîtriser les incertitudes des calculs. Les essais de transmissibilité vibratoire dans le sol ont été réalisés sur 16 sites. Les fonctions de transfert entre le sol et la structure du bâtiment ont été mesurées sur 10 sites. Il a été vérifié lors de l'analyse des fonctions de transfert vibratoires mesurées, que le nombre de points de mesure était suffisant pour assurer une bonne représentativité des caractéristiques vibratoires sur l'ensemble des secteurs traversés par la ligne.



La méthode d'élaboration des modèles de simulation répond aux pratiques usuelles et plus spécifiquement aux exigences de la norme ISO14837-1.

1.5. ÉVALUATION DES IMPACTS DUS AUX VIBRATIONS DU PROJET SANS MESURES DE MITIGATION, CAS DES BÂTIMENTS COURANTS PRÈS DE LA LIGNE EN SURFACE

Les simulations dans les bâtiments d'usage courant situés le long du tracé en surface (18,9 km) indiquent que les niveaux de vibration et de bruit solidien simulés en considérant une pose de voie classique sans dispositif de mitigation des vibrations, sont souvent inférieurs aux valeurs limites fixées. Cela concerne l'ensemble des bâtiments sur un linéaire de 11 km (soit 59 % de la longueur totale de voie étudiée).

Le dépassement modéré des critères sur certains tronçons, montre qu'il est nécessaire de prévoir des solutions usuelles de pose de voie ferrée permettant d'atténuer à la source les émissions vibratoires.

Par comparaison avec la situation d'autres projets de tramway récents, en France notamment, les résultats indiquent un faible risque d'impact lié aux vibrations générées en phase d'exploitation du tramway, en raison principalement d'une distance relativement grande entre les bâtiments et le tracé.

1.6. DÉFINITION DE MESURES DE MITIGATION DES VIBRATIONS

Pour les sites où les valeurs cibles sont dépassées, il est nécessaire de prévoir une ou plusieurs mesures de mitigation des vibrations. Il pourrait s'agir :

- De mesures d'évitement (exemple, éloignement du tracé vis-à-vis d'un site ou un secteur très sensible, relocalisation d'un équipement très sensible dans un local éloigné du projet);
- De mesures de réduction (mise en place de poses de voie anti-vibratile, réduction de la vitesse);
- De mesures particulières d'entretien des états de surface des rails et des roues (par des opérations régulières de meulage du rail et de reprofilage des roues).

Dans les cas courants d'insertion urbaine et de sensibilité des bâtiments aux vibrations, la mesure adoptée le plus souvent est la mise en place de poses de voie anti-vibratiles aux propriétés d'atténuation appropriées. Le risque d'impact résiduel après mise en place de ces mesures aujourd'hui éprouvées est généralement faible.

Trois types de pose de voie anti-vibratiles, fréquemment mis en œuvre dans les projets de tramway, sont pris en compte dans l'étude :

- Voie avec des semelles (ou couche) élastiques souples sous le rail;
- Voie sur une dalle flottante avec un tapis de matériau élastique souple;
- Voie sur une dalle flottante avec un tapis de matériau élastique très souple, donc plus performante que la précédente.

Les poses de voie anti-vibratiles sont simulées par leur courbe de pertes par insertion, qui correspond au niveau d'atténuation apportée par rapport au cas d'une pose de voie sans mitigation.

1.7. ÉVALUATION DES IMPACTS RÉSIDUELS APRÈS MISE EN PLACE DES MESURES DE MITIGATION, CAS DES BÂTIMENTS COURANTS PRÈS DE LA LIGNE EN SURFACE

Les simulations montrent qu'avec le recours aux mesures de mitigation usuelles, à savoir une des poses de voie anti-vibratiles présentées ci-dessus, l'impact résiduel devient faible pour tous les sites étudiés. En effet, les niveaux de vibration et de bruit solidien sont en dessous des limites fixées.

La solution de mitigation la plus utilisée est le système de pose de voie avec une semelle (ou couche) élastique souple sous le rail. Ce système fréquemment utilisé et relativement peu onéreux est envisagé sur environ 36 % de la longueur totale de la ligne étudiée (18,7 km).

La solution de pose sur dalle flottante, plus performante que la pose précédente, mais aussi plus contraignante en termes de construction et de maintenance, est envisagée au stade actuel des études, sur une section de 910 m.

1.8. MISE EN PERSPECTIVE DES RÉSULTATS / POURSUITE DES ÉTUDES

Les études vibratoires réalisées à ce jour, sur les secteurs où la ligne est en surface, ont permis de montrer que le niveau de risque d'impact lié aux vibrations du tramway était faible à modéré à Québec, en raison notamment de contraintes d'insertion urbaine modérées (rues assez larges dans l'ensemble). Les sites demandant une étude détaillée ont été identifiés. Les technologies de pose de voie ferrée des tramways permettent plusieurs niveaux d'atténuation des vibrations à la source. Les simulations montrent que la mise en place de ces systèmes permet de respecter les critères sur les sites où ces derniers sont dépassés dans le cas d'une pose de voie ferrée classique (sans dispositif d'atténuation).

Dans la suite du projet, il est nécessaire de rédiger un ensemble de spécifications techniques relatives au sujet des vibrations, à la lumière des conclusions de cette étude d'impact. Le consortium devra répondre à ces exigences exprimées en termes de performance (seuils limites de niveaux vibratoires et de bruit solidien à ne pas dépasser à l'intérieur des bâtiments), mais également en termes de moyens d'étude (modélisations et essais), de conception, de construction et de validation des systèmes de réduction des vibrations (dispositifs de poses de voie anti-vibratiles).

Il conviendra en phase d'ingénierie détaillée de faire les études d'impact vibratoire sur les sites très sensibles ayant fait l'objet d'une analyse de sensibilité dans la présente étude, et sur les sites sensibles à proximité des sections de ligne en souterrain. Pour ces sites en particulier, la démarche d'analyse à mettre en œuvre est résumée ci-dessous.

Démarche de contrôle des risques d'impact sur les sites très sensibles

La visite des sites très sensibles recensés à Québec en présence d'un représentant des lieux, a permis d'évaluer le niveau de risque d'impact sur chaque site et de déterminer les actions d'approfondissement nécessaires (modélisations et essais), à mettre en œuvre en phase d'ingénierie détaillée, pour étudier les risques d'impact et préciser les mesures de mitigation les plus appropriées en tenant compte des contraintes du projet.



Pour les sites avec appareils sensibles où un risque d'impact est jugé modéré ou fort, il est recommandé de (1) réaliser des mesures des niveaux vibratoires ambiants au pied des équipements sensibles sélectionnés, durant une période d'activité normale du site afin de définir un seuil vibratoire représentatif des conditions d'utilisation de l'appareil; (2) mesurer les fonctions de transfert vibratoire dans le sol entre la ligne et le bâtiment contenant l'appareil sensible, ainsi que les fonctions de transfert entre le sol et la dalle au pied de l'équipement sensible; et (3) calculer, à partir des grandeurs ci-dessus mesurées lors des essais, les niveaux de vibration au pied des équipements sensibles.

Après l'analyse à dire d'expert de la sensibilité des sites visités, les études approfondies concernent principalement l'Hôpital Saint-François d'Assise et l'INRS, qui sont les sites les plus exposés et comportant les activités les plus sensibles. Toutefois, une modélisation est conseillée également pour le GMFU Laurier, pour statuer sur l'absence de risque de perturbations d'un microscope confocal (appareil le plus sensible identifié), ainsi que sur le site du CHU de Québec-Université Laval, où le risque d'impact apparaît, avant simulation, relativement faible.

Pour les lieux où la sensibilité est en termes de bruit (salles de concert, cabine d'audiométrie, etc.), il est recommandé également de mettre en œuvre un modèle détaillé, en s'appuyant sur les essais de caractérisation des fonctions de transfert vibratoires citées ci-dessus, mais également de mesurer le bruit de fond (plutôt que le niveau vibratoire ambiant sur le plancher), et des caractéristiques acoustiques de la salle (temps de réverbération) afin de pouvoir calculer précisément le niveau de bruit solidien. Cela concerne le Grand Théâtre de Québec (notamment le Studio 29), la salle Raoul-Jobin du Palais Montcalm et Le Diamant. Il n'est pas nécessaire de poursuivre l'étude pour la salle Le Capitole dans la mesure où ce site est moins exposé et moins sensible que Le Diamant, plus proche du tracé.

Démarche de contrôle des risques d'impact dans les secteurs où la ligne est souterraine

Pour les sites de sensibilité courante dans le secteur « tunnel », l'approche méthodologique à mettre en œuvre pour la simulation des vibrations et bruits transmis par le sol depuis le tunnel en profondeur jusqu'aux bâtiments au-dessus nécessitant un jeu de données non accessibles au moment de la réalisation de l'étude d'impact, l'étude a consisté à réaliser, aux dires des experts, une analyse de la sensibilité aux vibrations par secteurs, en fonction des paramètres suivants : profondeur du tunnel, distance latérale entre la ligne et les bâtiments, présence de niveaux souterrains, présence de fondations profondes, sensibilité de l'activité des bâtiments, type de construction des bâtiments. Les conclusions de cette étude permettent de délimiter les zones de vigilance et bâtiments spécifiques qui devront être étudiées durant les études d'ingénierie détaillée à la charge du consortium. Cette analyse permet, en outre, d'identifier les zones où il est nécessaire de réaliser des essais vibratoires, mais également des essais de caractérisation des propriétés dynamiques du sol à l'aide de méthodes expérimentales utilisant des sondages géotechniques (méthode *Cross Hole*).

Le consortium devra répondre à un ensemble d'exigences spécifiques aux secteurs proches de la ligne en tunnel. Il s'agira, comme écrit ci-dessus, d'exigences de performance, mais également d'une méthodologie d'étude qu'il devra mener en phase de conception, de construction et de validation des systèmes de réduction des vibrations (dispositifs de poses de voie anti-vibratiles).



Le dispositif global mis en place par le consortium fera l'objet de la rédaction d'un Plan de gestion décrivant les différentes activités relatives à la maîtrise des vibrations et bruits solidiens transmis par le sol en phase d'exploitation du tramway. Le dispositif s'intéressera également aux autres phases :

- **Construction** avec la mise en place d'un protocole d'essais de validation des performances vibratoires des mesures de mitigation;
- **Réception** du système de transport avec la mise en place d'un protocole d'essais en ligne de contrôle du respect des seuils et des performances des mesures de mitigation en conditions réelles;
- **Exploitation/entretien** avec la mise en place d'un dispositif de maintien des niveaux d'excitation vibratoire par des campagnes périodiques de meulage des rails.



2. INTRODUCTION

2.1 CONTEXTE DE L'ÉTUDE

Les vibrations transmises par le sol peuvent être une préoccupation majeure pour les riverains de systèmes de transport urbain, comme le tramway et le métro. Les vibrations d'origine ferroviaire se transmettent à la structure des bâtiments par le sol, et sont susceptibles d'être perçues tactilement et de régénérer un bruit solidien pouvant s'accompagner d'une sensation de gêne chez les occupants. Contrairement au bruit aérien, la perception des vibrations dans un bâtiment, n'est pas une situation courante même dans les zones urbaines, signifiant qu'un nombre important d'individus se disent gênés dès lors que l'amplitude vibratoire transmise au corps dépasse à peine le seuil de perception.

Cette étude d'impact vibratoire concerne le projet de la future ligne de tramway urbain de la Ville de Québec qui s'étend du secteur Le Gendre (au sud-ouest de la ville), à la 76^e Rue (au nord-est), et reliant le pôle Sainte-Foy, l'Université Laval et le pôle Saint-Roch. Le tracé de la ligne de tramway est illustré sur la vue aérienne ci-dessous (Figure 1). La ligne d'une longueur de 23 km s'insère dans un contexte urbain relativement dense, le plus souvent au milieu d'avenues assez larges bordées de bâtiments résidentiels. La relative largeur des axes où s'insère la ligne est un paramètre plutôt favorable en termes de risques d'impact vibratoire et de coûts associés pour minimiser ces risques.

Dans deux secteurs particulièrement denses, la ligne progresse en souterrain, limitant de fait l'exposition aux bruits aériens des riverains dans ces secteurs. Il n'en est rien des vibrations qui générées à la base des tunnels qui vont se propager vers la surface jusqu'aux fondations des bâtiments avoisinants, parfois plus proches de la source, en cas de niveaux souterrains ou de fondations sur pieux. C'est dans ce contexte que la Ville de Québec a mandaté SYSTRA afin d'analyser et de limiter les risques d'impact lié aux vibrations et bruits solidiens transmis par le sol lors de l'exploitation de la ligne de tramway.



Figure 1 : Vue générale du tracé de la ligne de tramway dans la ville de Québec

2.2 OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

La démarche générale mise en œuvre dans cette étude est avant toute dédiée à l'analyse des risques d'impact vibratoire des sites sensibles avoisinants la future ligne de tramway.

Cette étude a nécessité en premier lieu d'analyser la sensibilité du milieu traversé par la ligne (identification des sites très sensibles et analyse de la sensibilité dans le cas courant), de réaliser des essais de caractérisation sur site des propriétés de transmissibilité vibratoire des sols et des bâtiments typiques de la ville de Québec afin de pouvoir simuler les niveaux de vibration et de bruit solidiens transmis dans un nombre suffisant de bâtiments représentatifs, et pour des paramètres de conception de base de la voie ferrée.

Sur la base des résultats de simulation obtenus pour une pose de voie ferrée standard, un des objectifs de l'étude a consisté dans les secteurs où les critères sont dépassés, à déterminer les mesures de mitigation nécessaires, à savoir les types de poses de voie ferrée anti-vibratiles appropriés, pour minimiser le risque d'impact vibratoire résiduel.



En d'autres termes, outre l'analyse des risques d'impact vibratoire, comme attendu par le MELCC, cette étude fournit :

- Une première estimation des systèmes d'atténuation des vibrations à déployer sur la ligne pour éviter ou minimiser les risques d'impact vibratoire le long du tracé;
- Les éléments techniques permettant de déterminer le jeu d'exigences en termes de performance et de méthodologie à respecter par le futur consortium chargé des études détaillées et de la construction (CCFE), pour maîtriser ces risques d'impact en intégrant les mesures de mitigation nécessaires dans la conception, et en prévoyant le dispositif de qualification et validation de ces mesures.

2.3 CONTENU DU RAPPORT

Ce rapport technique présente la méthodologie et les résultats de l'étude d'impact vibratoire de la ligne du futur tramway de Québec.

Le rapport comporte une description introductive à la problématique des vibrations ferroviaires (chapitre 3), les critères permettant d'évaluer et limiter le risque d'impact vibratoire (chapitre 4), la méthodologie générale de l'étude (chapitre 5). Les résultats de l'analyse de la sensibilité du milieu traversé par le projet sont présentés au chapitre 6.

La chapitre 7 présente la méthodologie mise en œuvre et les résultats de l'analyse du risque d'impact vibratoire pour les sections en surface, sans mesures de mitigation. Ce chapitre inclut une présentation des essais vibratoires menés sur site. Les solutions de mitigation des vibrations usuellement utilisées pour des projets de nouvelle ligne de tramway sont décrites au chapitre 8. Le chapitre 9 présente les résultats et les impacts résiduels après la mise en place des mesures de mitigation. Le chapitre 9 présente également la démarche à mener à une phase ultérieure (durant la phase d'ingénierie détaillée notamment) pour compléter ou approfondir les études vibratoires, permettant de préciser les solutions anti-vibratiles les plus appropriées pour maîtriser les risques d'impact dans tous les secteurs, y compris dans les secteurs en tunnel nécessitant des essais spécifiques non réalisés à ce jour, et en priorité sur les sites identifiés comme très sensibles. Enfin, un résumé des résultats de la présente étude d'impact ainsi qu'une liste de recommandations sont donnés en conclusion.

3. DESCRIPTION DES PHÉNOMÈNES

3.1 DÉFINITIONS ET NOTIONS DE VIBRATIONS

Définition

Les vibrations sont par définition des mouvements d'oscillations d'un objet (ou de particules d'un milieu solide) autour d'une position d'équilibre : l'objet se déplace de sa position d'équilibre puis effectue un mouvement périodique autour de cette position comme un pendule.

Description d'un mouvement vibratoire

Les vibrations sont caractérisées par :

- 1) l'amplitude **du mouvement vibratoire** qui peut être exprimée en **déplacement** (distance parcourue par les particules entre la position fixe à l'équilibre et sa position extrême), et/ou en **vitesse** dite particulaire (en m/s), et/ou en **accélération** (en m/s^2);
- 2) la **fréquence** f (en Hz) qui correspond au nombre d'oscillations (ou de cycles) par seconde. La fréquence est l'inverse de la période d'oscillation T ($f = 1/T$).

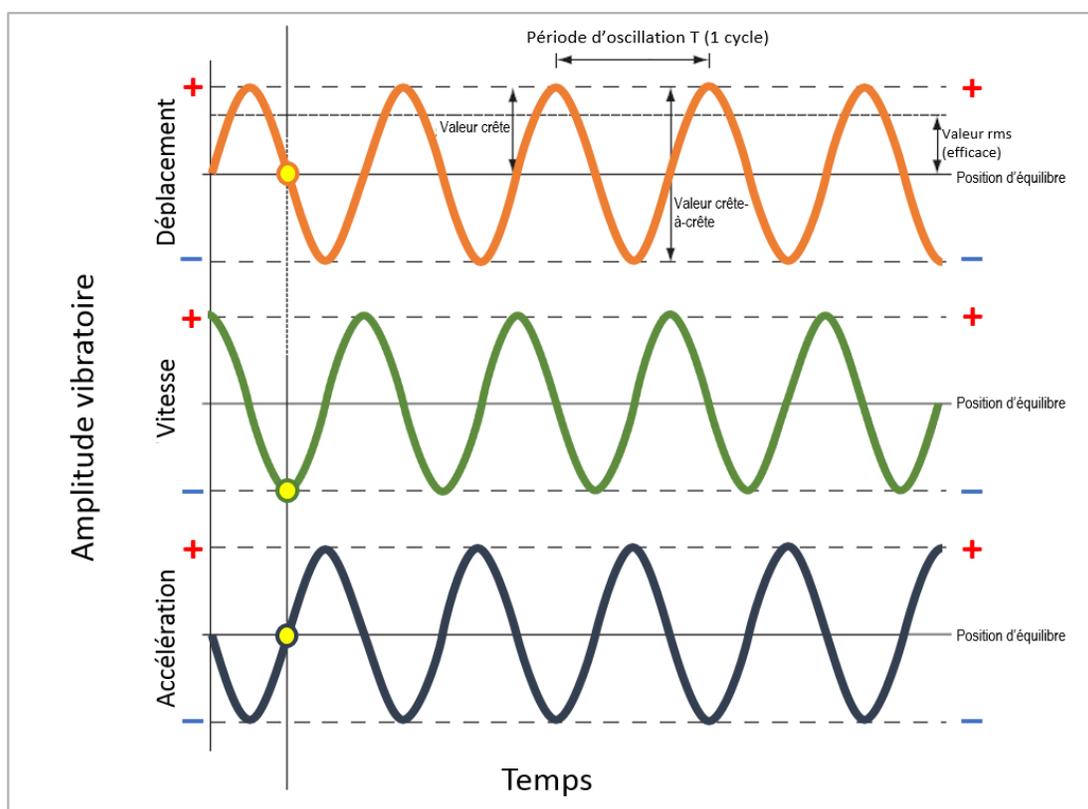


Figure 2 : Quantités utilisées pour caractériser un mouvement vibratoire

Pendant chaque cycle de vibration, la vitesse vibratoire devient maximale lorsque l'objet vibrant s'approche de sa position d'équilibre (en l'absence de vibrations), et nulle chaque fois qu'il atteint sa position extrême. L'accélération vibratoire est quant à elle maximale lorsque l'objet vibrant est en position extrême, et nulle chaque fois qu'il atteint sa position d'équilibre.

Notion d'ondes vibratoires

Dans un **milieu solide** comme le sol (ou une structure de grandes dimensions), les vibrations générées se traduisent par la formation d'ondes de volume se propageant dans le milieu à une vitesse appelée **célérité** ou **vitesse de propagation**.

La **célérité** de l'onde vibratoire (généralement notée c) s'exprime en m/s. Elle dépend des propriétés mécaniques du milieu de propagation. La relation suivante relie la fréquence f , la célérité c et la **longueur d'onde** λ (distance entre deux oscillations dans la même direction, en mètres) :

$$f = c / \lambda$$

Une excitation vibratoire exercée sur le sol génère des ondes qui se propagent. Malgré les phénomènes de réflexion et réfraction des ondes au niveau des interfaces entre couches de sol, l'énergie vibratoire tend à décroître en fonction de la distance parcourue. Le sol est un milieu propagatif et dissipatif.

En revanche, un bâtiment présentant des dimensions finies, les ondes se propageant dans la structure se réfléchissent aux limites, entraînant la création d'ondes dites stationnaires : son comportement vibratoire est dit résonnant, car il est dominé par la réponse de ses modes propres. Le phénomène de résonance est le résultat de la coïncidence des fréquences propres de la structure et des fréquences d'excitation. Dans un bâtiment soumis à des vibrations par le sol, les niveaux vibratoires sont maximaux à la fréquence propre des planchers. A contrario du sol qui est désigné comme un milieu propagatif, le bâtiment est considéré comme un système résonant.

Allure des signaux vibratoires

On parle de phénomènes vibratoires continus lorsque les vibrations se font sans interruption pendant une période d'observation. À l'inverse, les vibrations impulsives sont caractérisées par des phénomènes vibratoires de très courte durée. L'excitation vibratoire d'origine ferroviaire est assimilée continue.

Des exemples de signaux vibratoires mesurés sont donnés ci-dessous. La réponse vibratoire des composants de la voie ferrée est fortement marquée par le passage successif des essieux du véhicule. À mesure que l'on éloigne le point d'observation, l'influence de l'ensemble des essieux du train augmente, conduisant à une baisse des variations d'amplitude vibratoire lors du passage du train.

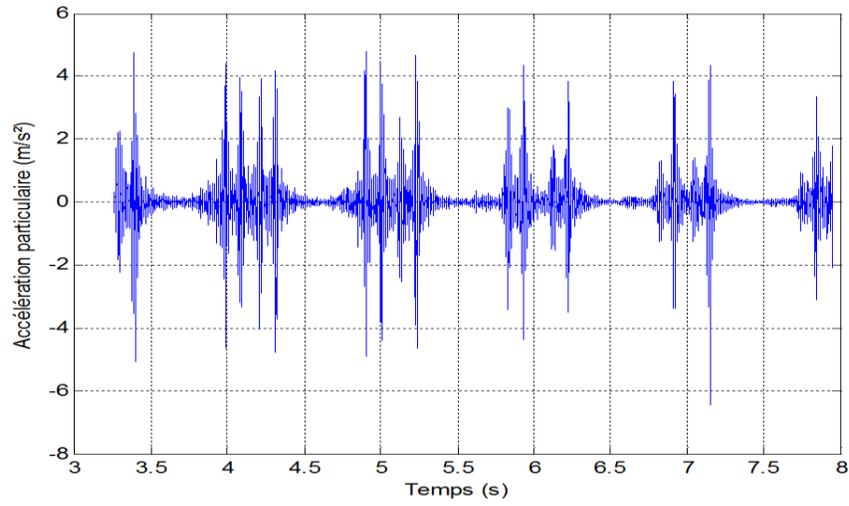


Figure 3 : Exemple de signal d'accélération vibratoire mesuré sur une traverse de la voie ferrée d'un système de transport urbain (Illustration SYSTRA)

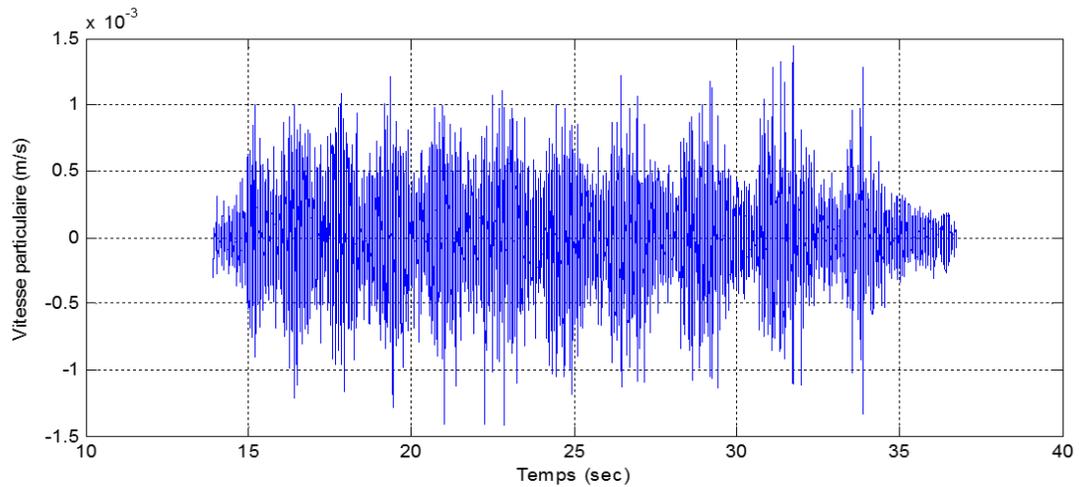


Figure 4 : Exemple de signal de vitesse vibratoire mesuré sur la plateforme en béton d'une voie ferrée d'un système de transport urbain (Illustration SYSTRA)

3.2 MÉCANISMES DE TRANSMISSION DES VIBRATIONS

Le trajet des vibrations ferroviaires depuis la ligne jusqu'aux locaux sensibles d'un bâtiment est illustré à la **Figure 5** (voie en surface) et **Figure 6** (voie en tunnel).

Les vibrations générées par la circulation d'un véhicule ferroviaire proviennent des interactions entre le train et la voie dans la zone de contact roue/rail. Les forces d'excitation agissant dans la zone de contact sont majoritairement la conséquence des irrégularités d'état de surface des rails et des roues (1), mais peuvent aussi provenir de discontinuités (appareil de voie sur une ligne ferroviaire). Ces vibrations se transmettent à la plateforme de la voie puis au sol, et se propagent dans le sol sous forme d'ondes avec des longueurs d'onde et une atténuation en fonction de la distance qui dépendent du sol considéré et de la fréquence d'excitation (2).

Plusieurs types d'ondes sont générés dans le sol, qui excitent ensuite les fondations (structure enterrée) des bâtiments situés à proximité et se transmettent à l'ensemble de la structure de ces bâtiments (3), produisant alors, des vibrations aux planchers, et par rayonnement, un bruit qualifié de solidien) (4).

Contrairement au bruit aérien (bruit résultant de la propagation dans l'air des ondes sonores), le bruit solidien provient des vibrations se propageant dans le sol qui dissipent en partie leur énergie. Seuls les bâtiments relativement proches de la ligne sont susceptibles d'être impactés. La distance d'impact varie en fonction du niveau d'excitation et les propriétés du sol.

Par ailleurs, la transmission des vibrations d'un milieu relativement souple (sol) à un milieu rigide (béton), ou inversement, n'est pas complète. Une partie non négligeable des vibrations sont renvoyées dans le milieu initial et n'atteignent donc pas les occupants de bâtiments.

Inversement, certaines dispositions constructives peuvent amener à amplifier les effets des vibrations dans le sol. C'est notamment le cas des planchers des bâtiments, dont le comportement dynamique s'exprime plus fortement sur des plages de fréquences spécifiques (modes propres). Les niveaux perçus correspondent alors à ces pics en amplitude. Ce phénomène est d'autant plus marqué que les fréquences sur lesquelles répondent les planchers coïncident fréquemment avec celles pour lesquelles l'excitation ferroviaire est importante (entre 40 et 80 Hz généralement).

L'ensemble de ces phénomènes décrits font l'objet d'une modélisation, dont chaque terme représente une étape de la transmission des vibrations, et permettant une estimation des niveaux de vibration et de bruits solidiens transmis aux bâtiments avoisinant une ligne ferroviaire.

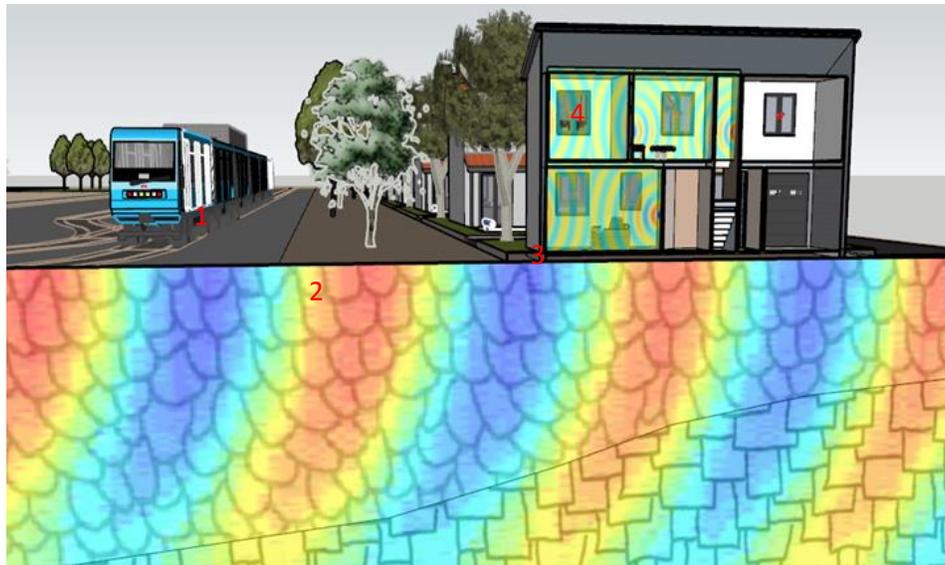


Figure 5 : Transmission des vibrations et bruits solidiens d'origine ferroviaire
Cas d'un système de transport en surface (Illustration SYSTRA)

- 1 Emission des vibrations (interaction train/voie)
- 2 Propagation des vibrations dans le sol
- 3 Transmission des vibrations dans le bâtiment
- 4 Génération du bruit solidien

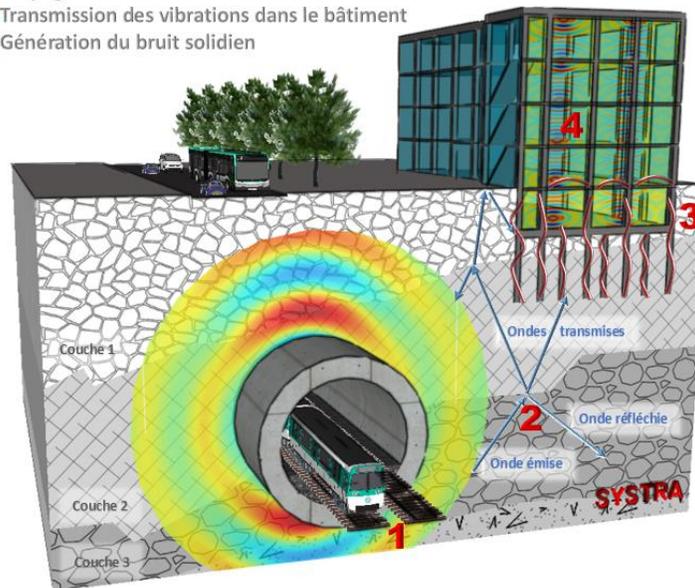


Figure 6 : Transmission des vibrations et bruits solidiens d'origine ferroviaire
Cas d'un système de transport en tunnel (Illustration SYSTRA)

4. CRITÈRES D'IMPACT VIBRATOIRE

4.1 INDICATEURS DE GÊNE DES RIVERAINS ET VALEURS CIBLES

Il n'existe pas de réglementation au Québec visant explicitement l'évaluation et la limitation des impacts liés aux vibrations générées par l'exploitation d'infrastructures ferroviaires.

Il est proposé de fixer les critères d'impact lié aux vibrations produites par l'exploitation de la ligne de tramway en se basant sur les lignes directrices du guide « FTA » [1].

Les critères dépendent de l'usage du récepteur considéré (destination, nature des activités).

Les critères sont des valeurs limites acceptables (appelées valeurs cibles ou seuils) des niveaux de vitesse vibratoire sur le plancher et de bruit solidien transmis à l'intérieur des locaux sensibles. Il est considéré qu'un impact notable peut se produire dès lors que ces valeurs sont dépassées.

Les valeurs limites de vibration sont exprimées en valeur r.m.s. « *root-mean-square* » de vitesse vibratoire sur plancher/dalle des espaces sensibles (par exemple, une chambre à coucher dans un logement). Les valeurs calculées correspondent à la valeur maximale du niveau de vitesse vibratoire $L_{Vmax,S}$ mesurée au centre du plancher des espaces sensibles (chambre à coucher, laboratoire, etc.) durant le passage d'une rame de métro. Ces niveaux sont exprimés en décibels, couramment en VdB (dB réf. $1\mu\text{-po/s}$) aux États-Unis ou en dB_V réf. $5 \times 10^8 \text{ m/s}$ en Europe. Dans ce rapport, l'unité utilisée est le dB_V . Le niveau de vitesse vibratoire du plancher est mesuré dans la direction verticale, analysé sur la bande de fréquences 8-80 Hz avec une constante de temps de 1 s (constante normalisée « Slow ») et sans pondération fréquentielle.

L'indicateur retenu pour évaluer les risques d'impact lié aux bruits solidiens transmis par le sol est le niveau $L_{pAmax,S}$ qui représente la valeur maximale du niveau de pression acoustique pondéré par le filtre A (exprimé en dB(A) réf. $20\mu\text{Pa}$) mesuré à l'intérieur du bâtiment durant le passage d'une rame de métro. Les niveaux de pression acoustique sont analysés en appliquant le filtre de pondération A et la constante de temps Slow (1 s). La position du point de mesure dans le local est définie dans la norme ISO/TS 14837-31.

Les valeurs cibles de vitesse vibratoire du plancher et de bruit solidien à considérer sont indiquées dans le tableau ci-dessous.

Note :

Les valeurs limites définies correspondent, non pas à une absence totale de gêne pour l'ensemble des individus exposés, mais à un faible pourcentage de personnes (<15 %) qui se disent fortement gênées.

Tableau 1 : Valeurs maximales recommandées de vitesse vibratoire ($L_{Vmax,S}$) et de bruit solidien ($L_{pAmax,S}$) à l'intérieur des bâtiments pour des événements fréquents, selon recommandations de FTA [1]

Catégorie de bâtiment selon usage	Niveau de vitesse vibration $L_{Vmax,S}$ sur plancher		Niveau de bruit solidien $L_{pAmax,S}$ (dB(A) réf. 20 μ Pa)
	VdB réf. 1 μ -po/s (USA)	dBv réf. 5 e ⁸ m/s (EU)	
Catégorie 1 : bâtiments où les vibrations peuvent perturber les activités (professionnelles)	65 (0,05 mm/s rms)	60 (0,05 mm/s rms)	40**
Catégorie 2 : Logements et bâtiments où les personnes dorment usuellement	72 (0,1 mm/s rms)	66 (0,1 mm/s rms)	35
Catégorie 3 : bâtiments institutionnels et administratifs avec usage diurne (essentiellement)	75 (0,14 mm/s rms)	69 (0,14 mm/s rms)	40
Autres bâtiments à usage et sensibilité spécifiques			
Studios d'enregistrement, studios TV, salles de concert	65 (0,05 mm/s rms)	60 (0,05 mm/s rms)	25
Auditoriums	72 (0,1 mm/s rms)	66 (0,1 mm/s rms)	30
Théâtres	72 (0,1 mm/s rms)	66 (0,1 mm/s rms)	35

* Ce critère limite est basé sur les niveaux qui sont acceptables pour la plupart des appareils modérément sensibles aux vibrations comme les microscopes optiques. Pour les équipements plus sensibles, une analyse détaillée devra être exécutée.

** Les équipements réputés sensibles aux vibrations ne sont généralement pas sensibles aux bruits solidiens ; cependant, les spécifications du fabricant de l'équipement devraient être revues pour déterminer sa sensibilité aux vibrations ainsi qu'aux bruits.

4.2 SEUILS DE SENSIBILITÉ D'APPAREILS SENSIBLES

Les vibrations générées lors de l'exploitation d'une ligne ferroviaire sont susceptibles de perturber le fonctionnement d'équipements de précision comme ceux utilisés en imagerie (microscopes optiques à balayage ou à effet tunnel, IRM, lasers, etc.) ou pour la fabrication de composants électroniques.

Les éléments permettant d'estimer la sensibilité d'un équipement sont les suivants :

- Les notices des constructeurs des équipements, indiquant les spécifications vibratoires propres à l'utilisation de l'équipement;
- La mesure des niveaux vibratoires ambiants sur la dalle au pied de l'appareil lors d'une journée d'activité normale.

En l'absence de ces éléments, il est possible d'avoir une première estimation du seuil de sensibilité en connaissant la classe de précision de l'appareil (exemple, grossissement d'un microscope) et en utilisant le jeu de critères vibratoires recommandés pour différentes catégories d'appareils sensibles par le guide de référence « FTA ». Ces critères vibratoires sont communément nommés courbes VC (Vibration criteria), et proviennent du guide de l'ASHRAE « *Practical Guide to Noise and Vibration Control for HVAC Systems* ».

Ces critères se présentent sous forme de seuils de niveaux par bande de tiers d'octave et s'appliquent à différentes classes d'équipements, comme indiqué dans le **Tableau 2** et représentés sur la **Figure 7** .

Notons que les critères vibratoires pour les équipements sensibles sont très en dessous des critères vibratoires retenus pour le confort des occupants de logements et/ou de bureaux. Cela met en évidence l'attention particulière qui doit être portée à l'étude d'impact vibratoire sur les bâtiments accueillants des activités sensibles.

Tableau 2 : Application et interprétation des courbes génériques VC (Vibration Criterion) recommandées pour les équipements sensibles

Gabarit	Amplitude ($\mu\text{m/s}$)	$L_{v\text{max},S}$ (dBV)	Précision typique (μm)	Description
VC-A	50	60	8	Applicable pour les microscopes ayant un grossissement $\leq x400$, les microbalances, les balances optiques et les équipements spécialisés similaires.
VC-B	25	54	3	Adéquat pour les microscopes ayant un agrandissement $\leq x1\ 000$, les instruments d'inspection et de lithographie de détail $\leq 3\ \mu\text{m}$.
VC-C	12.5	48	1-3	Adéquat pour les équipements de lithographie et d'inspection (ainsi que les microscopes électroniques à balayage peu sensibles) de détail $\leq 1\ \mu\text{m}$.
VC-D	6.25	42	0.1-0.3	Souhaitable pour la plupart des équipements très sensibles tels que les microscopes électroniques à balayage et à effet tunnel et les systèmes à faisceau d'électrons.
VC-E	3.12	36	< 0.1	Adéquat pour les équipements les plus sensibles tels que systèmes à visée laser de très haute précision, fonctionnant sur de longues durées, les systèmes de lithographie à faisceau d'électrons opérant à des échelles nanométriques et autres systèmes nécessitant une extraordinaire stabilité dynamique.
VC-F	1.56	30	N/A	Approprié pour les zones de recherches extrêmement calmes. Généralement difficile à obtenir dans la plupart des locaux, notamment les salles blanches. Ces seuils sont définis pour évaluation seulement.
VC-G	0.78	24	N/A	

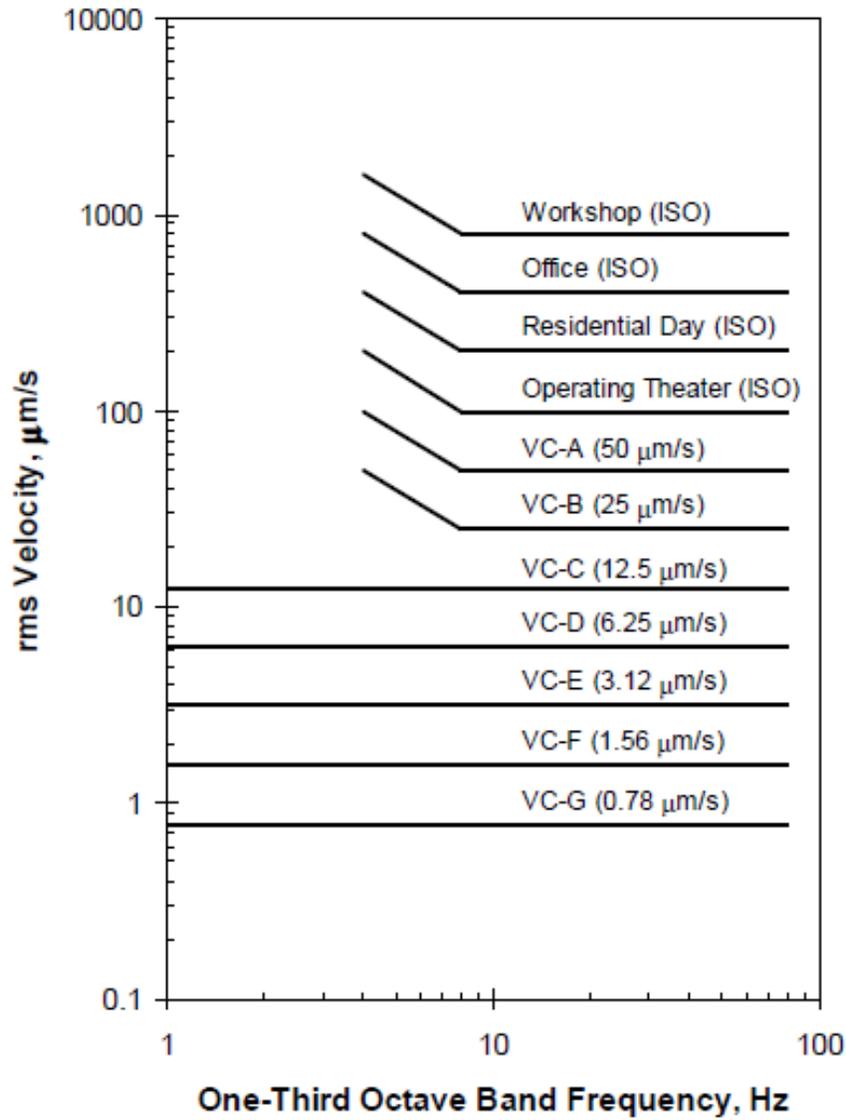


Figure 7 : Courbes génériques VC (Vibration Criterion) préconisées pour les équipements sensibles

5. MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE

La problématique à traiter et la méthodologie d'étude mise en œuvre dépendent des secteurs et des cas spécifiques rencontrés.

L'étude aborde séparément les trois cas suivants :

- **Cas 1** : bâtiments de sensibilité courante dans les secteurs proches de la ligne en surface;
- **Cas 2** : bâtiments de sensibilité courante dans les secteurs proches de la ligne en souterrain;
- **Cas 3** : sites avec des équipements et/ou des activités très sensibles aux vibrations et/ou aux bruits solidiens.

Dans le cas de *bâtiments courants proches de la ligne en surface (cas 1)*, une étude complète a été réalisée basée sur des modélisations accompagnées d'essais sur site à Québec, menés durant deux semaines au cours du mois de juillet 2019. L'étude comporte les étapes suivantes :

- **Étape 1** : Définition des sites d'étude (modélisations et/ou essais sur site) après une phase de délimitation de sections homogènes en termes de sensibilité et d'exposition aux vibrations et sélection d'un ou plusieurs bâtiments représentatifs de sensibilité courante et de chaque section homogène;
- **Étape 2** : Réalisation des essais sur site, pour la caractérisation des fonctions de transfert vibratoire dans le sol, et entre le sol et la structure du bâtiment;
- **Étape 3** : Calcul des niveaux de vibrations et de bruit solidien à l'intérieur des bâtiments sélectionnés, en utilisant les grandeurs mesurées sur site, en étape 2;
- **Étape 4** : Analyse du risque d'impact dans les bâtiments par comparaison des niveaux de vibration et de bruit solidiens calculés avec les valeurs limites fixées;
- **Étape 5** : Définition de mesures de mitigation des vibrations applicables dans les secteurs où les niveaux de vibration et de bruit solidien sont en excès des valeurs limites;
- **Étape 6** : Reprise des calculs avec prise en compte de l'effet des mesures de mitigation et analyse des impacts résiduels.

Au sujet de l'étape 1, pour analyser le risque d'impact dans le cas courant, l'étude se concentre sur un nombre conséquent de bâtiments/sites sensibles jugés représentatifs de groupes de bâtiments homogènes en termes de sensibilité. L'ensemble de la ligne du tramway est décomposé en tronçons homogènes (en termes d'exposition et de sensibilité aux vibrations et aux bruits solidiens). Pour chaque tronçon, les niveaux vibratoires et de bruits solidiens sont déterminés sur le site représentatif.

Dans le cas de *bâtiments courants proches de la ligne en souterrain (cas 2)*, une première analyse de sensibilité des bâtiments dans les secteurs concernés a été réalisée, conduisant à la sélection de bâtiments représentatifs à étudier. En revanche, il n'a pas été possible de réaliser à ce jour, des essais vibratoires sur site, comme pour les bâtiments étudiés le long des sections de ligne en surface. En effet, ce type d'essais pour la section en tunnel nécessitent de réaliser des sondages géotechniques pour pouvoir caractériser les propriétés dynamiques/vibratoires du sol (essais *Cross Hole* accompagnés d'essais de mesure des transferts vibratoires depuis le fond du forage jusqu'en surface). De tels essais et les modélisations associées seront réalisés en phase d'ingénierie détaillée, sur la base de prescriptions techniques précises.



Dans le cas de *bâtiments de sensibilité particulière (cas 3)*, le travail réalisé a comporté les étapes suivantes :

- **Étape 1** : Visite des sites très sensibles en présence d'un représentant du site, afin de collecter l'information nécessaire à une première évaluation du niveau de risque d'impact : le type et la classe de précision des équipements les plus sensibles, leur localisation vis-à-vis du tracé, et la présence ou non de dispositifs anti-vibratiles sous ou à l'intérieur des équipements, l'identification d'éventuelles sources vibratoires parasites, sensibilité des locaux au bruit solidien, etc. Ces visites se sont déroulées entre le 22 juillet et le 2 août 2019, et ont concerné au total 9 sites.
- **Étape 2** : Évaluation (à dire d'expert et à titre indicatif) du seuil de sensibilité des appareils ou activités sensibles concernées.
- **Étape 3** : Proposition d'une démarche d'étude de détail (modélisations et essais), à réaliser en phase d'ingénierie de détails.

De manière générale, les études vibratoires pour les sites à fort enjeu (cas 2 et 3) requièrent des moyens conséquents et la connaissance de paramètres non accessibles à ce stade du projet. Ces études seront à la charge du consortium chargé de la réalisation, qui aura la connaissance et la maîtrise de tous les paramètres pour permettre de réaliser ces analyses approfondies.

Ce rapport donne néanmoins des recommandations sur la méthodologie à mettre en œuvre pour ces deux dernières catégories de sites. Les éléments préconisés sont relatifs à la modélisation des vibrations transmises aux sites étudiés, pour chacun des deux cas (voie en tunnel et site spécifiquement sensible). Les préconisations concernent également les essais à réaliser et les paramètres à recueillir pour alimenter les études futures. Notamment des essais géotechniques de caractérisation des propriétés dynamiques du sol (par méthode MASW ou *Cross Hole*) pour les sections en tunnel sont recommandés.

6. ANALYSE DE LA SENSIBILITÉ DU MILIEU

6.1 ANALYSE GÉNÉRALE

Le projet s'insère à proximité de plusieurs sites particulièrement sensibles aux vibrations ou aux bruits solidiens. Les sites comportant des appareils sensibles susceptibles d'être impactés par le tramway sont l'Université Laval, le CHU de Québec-Université Laval (CHUL), le GMFU Laurier, l'INRS, et l'Hôpital Saint-François d'Assise.

Les autres sites à sensibilité particulière sont des salles de concert ou spectacle et des studios musicaux : le Grand Théâtre de Québec, dont le studio 29 est le local le plus exposé (à 35 m du tracé), la salle Raoul-Jobin du Palais Montcalm et Le Diamant (toutes deux situées à environ 40 m), et Le Capitole (situé à l'arrière du Diamant à environ 80 m).

En dehors des sites de sensibilité particulière, mentionnés précédemment, les bâtiments d'usage courant (logement, hôtels, écoles, églises, bureaux, administrations, etc.) présents le long du tracé présentent, a priori, un risque d'impact faible à modéré, en raison principalement d'une distance assez grande entre les bâtiments et le tracé de la ligne (souvent supérieure à 15 m) sauf dans les rues suivantes : le chemin des Quatre-Bourgeois (distance d'environ 13 m), le boulevard René-Levesque (distance d'environ 12 m), la rue de la Croix-Rouge et la 1^{ère} Avenue (distance d'environ 7-8 m).

La ligne longe un nombre important de maisons individuelles et de petits immeubles résidentiels de construction assez semblable : la partie basse de ces bâtiments est généralement en maçonnerie; la structure des étages supérieurs peut être quant à elle en bois. Cette configuration n'apparaît pas favorable en termes de comportement vibratoire. Pour cette raison, il est prévu de caractériser par des essais sur site le comportement vibratoire de plusieurs bâtiments de ce type.

Pour rappel, l'objectif final des études vibratoires est de déterminer les secteurs où le risque d'impact est faible et ceux où l'on doit envisager une pose de voie ferrée anti-vibratile (ou toute autre mesure de réduction des vibrations). L'étude doit donc porter en priorité sur les sites réputés très sensibles aux vibrations et/ou aux bruits solidiens (voir plus haut), mais également aux sites de sensibilité courante.

Ces sites étant très nombreux, l'analyse vibratoire est réalisée, non pas bâtiment par bâtiment, mais pour un nombre suffisant de bâtiments, jugés représentatifs en termes de sensibilité et d'exposition aux vibrations. Chaque *site/bâtiment représentatif* est associé à un groupe de bâtiments de sensibilité homogène situés dans un même secteur, appelé *tronçon homogène*.

6.2 DÉFINITION DES SITES REPRÉSENTATIFS ET DES TRONÇONS HOMOGÈNES ASSOCIÉS

La liste des récepteurs sensibles étudiés et les tronçons homogènes associés sont définis en adoptant la méthode décrite ci-dessous.

Un couloir situé de part à d'autres de l'axe du projet est d'abord tracé. La bande ainsi formée représente la zone d'influence vibratoire du projet dans le cas des sites modérément sensibles.

La bande est ensuite découpée en tronçons homogènes, dont les caractéristiques influentes peuvent être considérées constantes. Ces caractéristiques sont relatives au projet (vitesse du train, propriétés de la

voie, etc.), à la nature des sols (propriétés mécaniques du sol, profondeur de la première couche rigide, etc.) et à la nature des bâtiments riverains (destination, nombre d'étages, typologie des planchers et des fondations, etc.). En première approche, les plages de variations acceptables pour les différents paramètres sont les suivantes :

Caractéristiques du projet :

- Vitesse du train variant d'au plus 20 km/h;
- Pas de modifications du type de pose de voie;
- Les appareils de voies doivent faire l'objet d'une zone spécifique pour laquelle l'excitation est majorée par un facteur correctif.

Caractéristiques du sol :

- Profil géologique relativement homogène;
- Profondeur de la couche rigide relativement constante;
- Pour les sections en tunnel, un profil géologique constitué des mêmes couches de sol avec un tunnel de profondeur dans le même horizon et de profondeur variant de moins de 3 m.

Caractéristiques des bâtiments récepteurs (bâtiments représentatifs des zones homogènes) :

- Bâtiments appartenant à l'une des deux catégories suivantes : maison individuelle ou petit immeuble résidentiel de moins de 5 étages en structure bois, grand immeuble de 5 étages ou plus en structure bétonnée;
- Bâtiments de destination (activité) similaire en majorité (catégories définies dans le **Tableau 1**);
- Une distance par rapport au tracé variant de moins de 20 % de la distance la plus faible.

Dans le cas où cette approche conduirait à un nombre trop important de tronçons homogènes ou à des tronçons homogènes de trop faible longueur (<40 m), plusieurs tronçons consécutifs peuvent être fusionnés en adoptant un principe conservatif. Ce principe n'a pas été utilisé dans cette étude.

Une fois les tronçons homogènes constitués, un bâtiment représentatif est sélectionné pour chaque tronçon, en prenant soin de sélectionner un bâtiment dimensionnant (principe conservatif).

La vitesse du matériel roulant considérée pour les simulations est la vitesse maximale sur le tronçon homogène (principe conservatif).

6.3 ANALYSE DES SITES TRÈS SENSIBLES

6.3.1 Démarche

Les sites spécifiquement sensibles aux vibrations identifiés le long du tracé sont traités dans cette étude comme des cas particuliers. Certains d'entre eux peuvent nécessiter une étude approfondie en appliquant une méthodologie spécifique. D'autres au contraire, bien que sensibles, vont présenter un risque d'impact faible en raison par exemple de l'éloignement des équipements sensibles par rapport au tracé, ou un niveau de sensibilité des équipements plus faible qu'attendu.



Afin de statuer sur le niveau de risque pour chacun des sites a priori sensibles et sur la méthodologie à mettre en œuvre, une visite de neuf sites a été réalisée.

Lors de ces visites, les informations suivantes ont été recueillies (quand cela était possible) :

- Type et emplacement des équipements sensibles les plus exposés et/ou les plus sensibles;
- Spécifications vibratoires de la part du constructeur de l'équipement;
- Le mode d'utilisation de l'équipement (fréquence, précaution vis-à-vis de l'environnement);
- La présence ou non de système anti-vibratile disposé sous l'équipement;
- Un descriptif de l'environnement vibratoire actuel de l'équipement (passage à proximité, local isolé, en sous-sol, etc.);
- Toute information supplémentaire relative à l'environnement vibratoire de l'équipement;
- Les plans de structure des bâtiments abritant les activités/équipements sensibles.

Suite à la visite, la sensibilité est évaluée. Dans le cas d'une grande sensibilité et d'une exposition importante, la méthodologie à mettre en œuvre pour l'estimation des niveaux vibratoires peut différer par rapport à la méthode utilisée dans le cadre de site de sensibilité courante. Les dispositions méthodologiques à prendre en compte dans ce type de situation sont présentées dans le chapitre 9.

Dans ce qui suit, une description de chaque site spécifiquement sensible est donnée.

6.3.2 Grand Théâtre de Québec et Conservatoire

Le Grand Théâtre de Québec est un bâtiment abritant deux salles de spectacles (théâtre, musique classique et musique amplifiée) de 1 850 et 550 places. Il jouxte le Conservatoire de Québec dont les locaux abritent également des studios d'enregistrement.

Les activités susceptibles d'être le plus perturbées par l'opération du tramway, en tunnel dans ce secteur, sont les représentations non amplifiées, se déroulant dans les deux salles de spectacles du Grand Théâtre, ainsi que les enregistrements dans les studios du conservatoire.



Vue aérienne



Studio 29



Grande salle



Portion de la murale de Jordi Bonet

Figure 8 : Grand Théâtre de Québec.

À noter la présence d'une fresque sculptée d'une grande valeur historique (La murale de Jordi Bonet), dans le hall d'entrée du Grand Théâtre. Cette fresque constituée d'éléments en béton est peu sensible aux vibrations; l'activité du studio et les représentations dans la grande salle sont de loin plus sensibles. Les valeurs de seuil prescrites pour ces activités couvrent sans ambiguïté, le risque de dommages de la fresque, jugé négligeable.

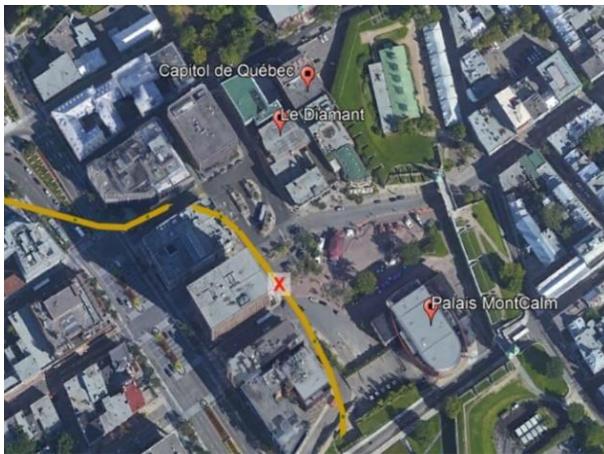
Au vu des spécificités du site, il est recommandé de fixer une valeur maximale de bruit solide de 25 dB(A) dans les locaux sensibles du Grand Théâtre (grande salle) et du Conservatoire (studio 29). Cette sensibilité est choisie en adéquation avec les activités les plus sensibles : enregistrement, représentation de musique non amplifiée.

Une étude d'impact dédiée à ce site est fortement recommandée, en réalisant une modélisation détaillée et des essais vibratoires et acoustiques sur site. Le modèle doit tenir compte des paramètres suivants :

réponse vibratoire du tunnel couplé au sol (modélisation), fonction de transfert vibratoire entre le sol et le plancher des locaux sensibles (caractérisée par essais), les temps de réverbération dans le studio d'enregistrement et dans la grande salle (caractérisé par essais). Il est en outre recommandé de procéder à une mesure dans les locaux sensibles, du bruit de fond résiduel (climatisation éteinte) sur la bande de fréquences [8-250Hz], pour confirmer le seuil de sensibilité.

6.3.3 Palais Montcalm

Le Palais Montcalm contient deux salles, dont la salle Raoul-Jobin d'environ 1 000 places dédiée à la musique. Les activités susceptibles d'être le plus perturbées par l'exploitation du tramway en tunnel sont les représentations non amplifiées, se déroulant dans la salle de spectacle du Palais.



Vue aérienne



Salle Raoul-Jobin

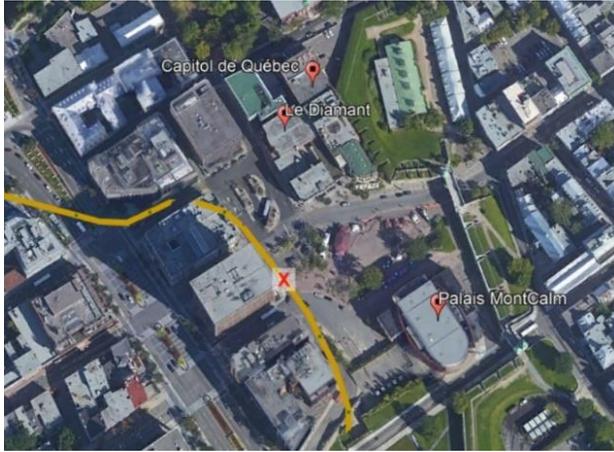
Figure 9 : Palais Montcalm.

Au vu des spécificités du site, il est recommandé de fixer une valeur maximale de bruit solidien de 25dB(A). Cette sensibilité est choisie en adéquation avec les activités les plus sensibles au bruit du site, à savoir les concerts de musique non amplifiée.

Une étude d'impact est recommandée sur ce site, en adoptant une approche comparable à celle recommandée pour le Grand Théâtre de Québec, c'est-à-dire basée sur une modélisation détaillée et des essais vibratoires et acoustiques sur site.

6.3.4 Le Diamant

Le Diamant est un lieu de diffusion culturelle avec une salle de spectacle dédiée aux arts de performance comme le cirque, le théâtre ou l'opéra, ainsi que le multimédia, amplifié ou non. Les activités susceptibles d'être perturbées par l'exploitation du tramway en tunnel sont les représentations de musique non amplifiées, se déroulant dans la salle de spectacle.



Vue aérienne



Salle de spectacle

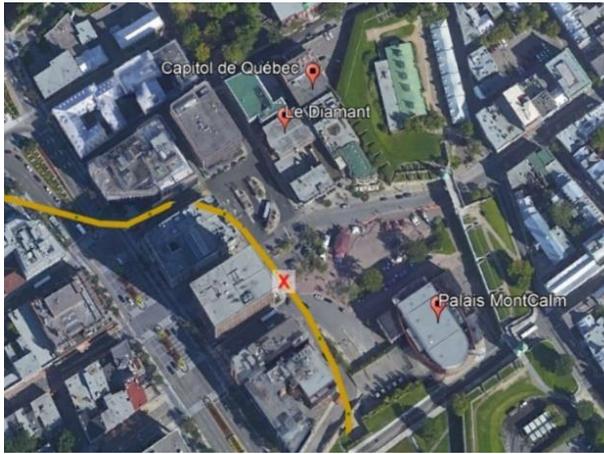
Figure 10 : Salle du Diamant.

Au vu des spécificités du site, il est recommandé de fixer une valeur maximale de bruit solide de 25dB(A). Cette sensibilité est choisie en adéquation avec les activités les plus sensibles au bruit du site, à savoir les concerts de musique non amplifiée.

Une étude d'impact est recommandée sur ce site, en adoptant une approche comparable à celle recommandée pour le Grand Théâtre de Québec, c'est-à-dire basée sur une modélisation détaillée et des essais vibratoires et acoustiques sur site.

6.3.5 Le Capitole

Le Capitole est une salle de spectacle dédiée à la musique amplifiée datant de 1904. Les activités susceptibles d'être perturbées par l'exploitation du tramway en tunnel sont les représentations, se déroulant dans la salle de spectacle du Capitole.



Vue aérienne



Salle de spectacle

Figure 11 : Salle du Capitole.

Au vu des spécificités du site, il est recommandé de fixer une valeur maximale de bruit solide de 30dB(A). Cette sensibilité est choisie en adéquation avec les activités les plus sensibles au bruit du site, à savoir les concerts de musique amplifiée.

Étant donné que cette salle est moins sensible et moins exposée que la salle du Diamant, il n'est pas nécessaire de poursuivre les études sur ce site.

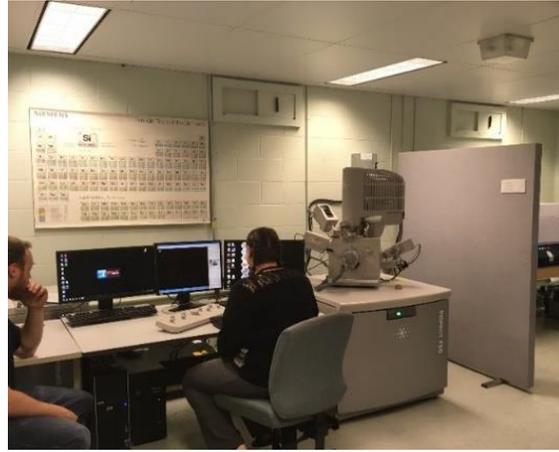
6.3.6 Université Laval

L'Université Laval est un site très étendu avec un nombre important de bâtiments (résidence, enseignement, recherche). Le bâtiment le plus sensible aux vibrations est le pavillon Adrien Pouliot, car il contient un nombre important d'appareils de grande précision donc très sensibles aux vibrations. Le Pavillon Paul Comtois contient également un grand nombre d'équipements sensibles également, mais il se situe à plus grande distance du tracé (en dehors de la zone d'impact).

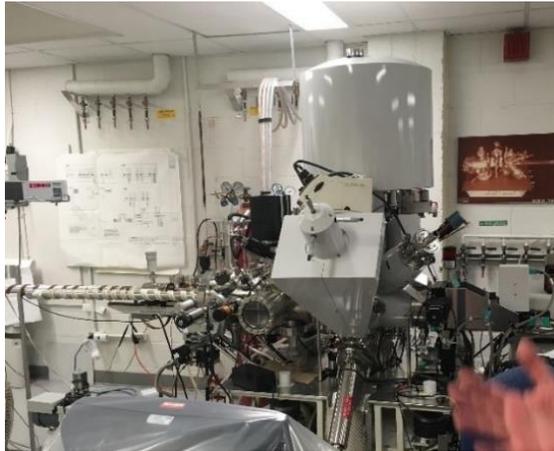
Les activités du pavillon Adrien Pouliot, susceptibles d'être perturbées par l'exploitation du tramway en surface, sont les mesures utilisant les équipements suivants : un spectromètre de masse et un microscope à force atomique (laboratoire de génie chimique, salle 00545, 180 m du tracé), un microscope électronique à baillage (Inspect F50 Plasma Cleaner, laboratoire de géologie, salle 00712, 150 m du tracé) et un microscope à force atomique (laboratoire de métallurgie, salle 00798, 110 m).



Vue aérienne



Microscope MEB



Spectromètre



Microscope AFM

Figure 12 : Équipements spécifiquement sensibles présents dans les locaux de l'université

En première approche, le seuil de sensibilité à considérer pour analyser le risque d'impact sur ce site correspond à la courbe VC-D (42dBv) pour le microscope AFM et le spectromètre, voire VC-F (30dBv) pour le microscope MEB. Le critère VC-F défini par le fabricant peut sembler « surcontraignant », car assez vraisemblablement inférieur aux niveaux vibratoires ambiants (à confirmer par un essai).

Dans la mesure où ces équipements reposent sur des tables anti-vibratiles, les critères pourront être revus après avoir caractérisé l'efficacité en termes d'atténuation du dispositif anti-vibratile, lors des mesures des niveaux vibratoires ambiants.

Des mesures du niveau de vitesse vibratoire ambiant sur une durée courte (10 min) ont été réalisées durant la visite. Les valeurs des niveaux $L_{veq,10min}$ sont de 52dBv au pied de du microscope AFM et de 43dBv au pied de du microscope MEB. Ces valeurs ont été observées sur une durée très courte et en l'absence de toute activité dans les locaux. Afin de statuer sur une valeur de seuil vibratoire représentative du risque de perturbation de l'équipement, il est recommandé de réaliser des mesures des niveaux vibratoires ambiants sur une durée plus longue (1 à 2 jours), au pied des deux équipements (microscopes AFM et



MEB). Cette mesure se déroulera lors d'une journée d'activité normale de l'équipement, sans perturbation de son fonctionnement.

6.3.7 CHU de Québec-Université Laval (CHUL)

Le site du Centre hospitalier de l'Université Laval (CHUL) est un site étendu comprenant plusieurs bâtiments dédiés aux soins et à la recherche. Le bâtiment le plus exposé est le bâtiment A. Le bâtiment contenant l'équipement le plus sensible est le bâtiment T.

Les activités susceptibles d'être perturbées par l'exploitation du tramway en surface sont les mesures médicales utilisant des appareils très sensibles, les examens d'audiologie et les interventions d'angiographie. Lors de la visite de reconnaissance, trois équipements/locaux sensibles ont été identifiés : une salle d'angiographie et une salle de radiographie (situé dans le bâtiment A, salles 0340 et 0580, à 35 m de la voie), plusieurs cabines d'examens d'audiologie (situé dans le bâtiment B, salles B-01, à 100 m de la voie) et un microscope à balayage électronique (situé dans le bâtiment T, en sous-sol, à 130 m de la voie).



Vue aérienne



Cabine d'audiométrie (bât. B)



Microscope MB (bât. T)



Salle de radiologie (bât. A)

Figure 13 : Équipements spécifiquement sensibles présents dans les locaux du CHU-L

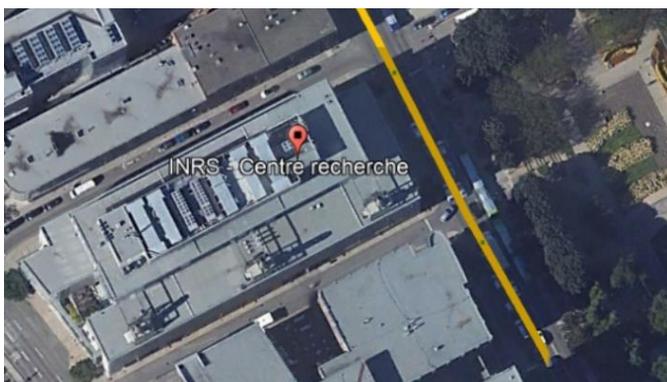
En première approche, le seuil de sensibilité à considérer pour analyser le risque d'impact sur ce site correspond à la courbe VC-A (60dBv) pour la salle de radiologie dans le bâtiment A, un niveau de bruit solide maximal de 30dB(A) dans la cabine d'audiométrie (bâtiment B) et un seuil équivalent à VC-D (42 dBv) pour le microscope MEB (bâtiment T).

Des mesures du niveau de vitesse vibratoire ambiant sur une durée courte (10 min) ont été réalisées durant la visite. Les valeurs des niveaux $L_{\text{veq},10\text{min}}$ sont de 59 dBv dans la cabine d'audiométrie et de 47dBv au pied de du microscope MEB. Ces valeurs ont été observées sur une durée très courte. Afin de statuer sur une valeur de seuil vibratoire représentative du risque de perturbation de l'équipement/activité, il est recommandé de réaliser une mesure des niveaux vibratoires ambiants sur une durée plus longue (1 à 2 jours), au pied du microscope MEB, ainsi qu'une mesure de bruit de fond dans la cabine d'audiométrie. Cette mesure se déroulera lors d'une journée d'activité normale de l'équipement, sans perturbation de son fonctionnement.

6.3.8 INRS

Le site de l'Institut national de la recherche scientifique (INRS) comprend un bâtiment dédié à la recherche scientifique, à faible distance du tracé, au droit de la zone de transition entre le tunnel et la voie en surface. Ce bâtiment contient un nombre important d'équipements sensibles aux vibrations.

Les activités susceptibles d'être perturbées par l'exploitation du tramway en surface sont les mesures utilisant les équipements suivants : un spectromètre (Laboratoire de spectroscopie), un microscope électronique à balayage (laboratoire de microscopie à balayage électronique, salle 3417) et une cytométrie de flux (laboratoire d'instrumentation, salle 5420).



Vue aérienne



Microscope MEB

Figure 14 : Équipements spécifiquement sensibles présents dans les locaux de l'INRS

En première approche, le seuil de sensibilité à considérer pour analyser le risque d'impact sur ce site correspond à la courbe VC-D (42dBv) pour le microscope MEB.

Des mesures du niveau de vitesse vibratoire ambiant sur une durée courte (10 min) ont été réalisées durant la visite. Les valeurs des niveaux $L_{Veq,10min}$ sont de 67dB_v au pied du microscope MEB et de 78dB_v au pied du spectromètre. Ces valeurs ont été observées sur une durée très courte. Afin de statuer sur une valeur de seuil vibratoire représentative du risque de perturbation de l'équipement/activité, il est recommandé de réaliser une mesure des niveaux vibratoires ambiants sur une durée plus longue (1 à 2 jours), au pied du microscope MEB, ainsi qu'une mesure de bruit de fond dans la cabine d'audiométrie. Cette mesure se déroulera lors d'une journée d'activité normale de l'équipement, sans perturbation de son fonctionnement.

Dans la mesure où ces équipements reposent sur des tables anti-vibratiles, les critères pourront être revus après avoir caractérisé l'efficacité en termes d'atténuation du dispositif anti-vibratile, lors des mesures des niveaux vibratoires ambiants.

Compte tenu de la faible distance entre la ligne et la façade du bâtiment (environ 10 m) et de la forte sensibilité du microscope MEB, une méthodologie de modélisation approfondie est recommandée pour permettre une bonne estimation des niveaux de vibrations au pied de l'équipement.

6.3.9 L'Hôpital Saint-François-d'Assise

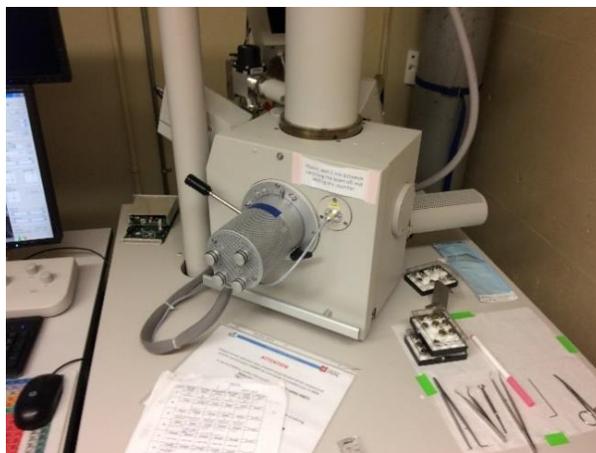
Le site de l'Hôpital Saint-François d'Assise est un site étendu comprenant plusieurs bâtiments dédiés aux soins et à la recherche. Le bâtiment le plus exposé est le bâtiment A. Les bâtiments contenant les équipements les plus sensibles sont les bâtiments D et E.

Les activités susceptibles d'être perturbées par l'exploitation du tramway en surface sont les mesures utilisant les équipements spécifiquement sensibles ainsi que les examens d'audiologie. Lors de la visite de reconnaissance, de nombreux appareils sensibles ont été identifiés :

- Dans le bâtiment E au deuxième sous-sol : un microscope AFM en salle blanche (salle E00 156), un microscope MEB (salle E00 183), un spectromètre à rayon X (salle E00 163) et une balance de précision (salle E00 183A);
- Dans le bâtiment A, au rez-de-chaussée : plusieurs cabines d'examens d'audiologie (salles A1 183);
- Dans le bâtiment D : un microscope AFM (deuxième sous-sol, salle D00 747a) et une lectrice de carte micrométrique Proton (précision micrométrique, 1^{er} étage, salle D1 735a).



Vue aérienne



Microscope MEB

Figure 15 : Équipements spécifiquement sensibles présents dans les locaux de l'Hôpital Saint-François d'Assise

En première approche, le seuil de sensibilité à considérer pour analyser le risque d'impact sur ce site correspond à la courbe VC-A (60dBv) et un niveau de bruit solide maximal de 30 dB(A) pour la cabine d'audiométrie et les balances de précision dans le bâtiment A (le plus proche), et à la courbe VC-D (42dBv) pour les microscopes MEB et AFM dans les bâtiments E et D, plus éloignés.

Des mesures du niveau de vitesse vibratoire ambiant sur une durée courte (10 min) ont été réalisées durant la visite. Les valeurs des niveaux $L_{veq,10min}$ sont de 53dB_v au pied d'une balance de précision (bâtiment A) et de 51 et 50dB_v au pied des microscopes MEB et AFM, et enfin de 63dB_v dans la cabine d'audiométrie. Ces valeurs ont été observées sur une durée très courte. Afin de statuer sur une valeur de seuil vibratoire représentative du risque de perturbation de l'équipement/activité, il est recommandé de réaliser une mesure des niveaux vibratoires ambiants sur une durée plus longue (1 à 2 jours), au pied des microscopes MEB et AFM, ainsi qu'une mesure de bruit de fond dans la cabine d'audiométrie. Cette

mesure se déroulera lors d'une journée d'activité normale de l'équipement, sans perturbation de son fonctionnement.

Compte tenu de la faible distance entre la ligne et la façade du bâtiment A (environ 10 m) et la sensibilité au bruit de la cabine d'audiométrie, une méthodologie de modélisation approfondie est recommandée pour permettre une bonne estimation des niveaux de bruits solidiens générés dans les cabines. La nécessité de réaliser un modèle détaillé pour étudier les risques d'impact sur les microscopes dans les bâtiments plus éloignés reste à évaluer.

6.3.10 Synthèse des critères pour les sites spécifiquement sensibles

Les sites spécifiquement sensibles aux vibrations ont nécessité une étude de sensibilité dédiée, basée sur les éléments collectés lors d'une visite du site, en présence des gérants et/ou utilisateurs des activités/équipements sensibles du site.

Une synthèse de l'évaluation à dire d'expert du niveau de sensibilité (ou du seuil à considérer) pour les équipements les plus sensibles de chaque site est indiquée dans le **Tableau 3**. Les actions qu'il est conseillé de réaliser dans le cadre des études détaillées y sont également indiquées.

Tableau 3 : Synthèse des estimations préliminaires de la sensibilité des sites spécifiquement sensibles

Site	Activité Équipement	Distance* (m)	Sensibilité	Seuil recommandé**	Actions recommandées
Grand Théâtre du Québec	Enregistrement	30	Bruit solidien	25 dB(A)	Modélisation approfondie, essais vibratoires et acoustiques
Palais Montcalm	Concert	50	Bruit solidien	30 dB(A)	Modélisation approfondie, essais vibratoires et acoustiques
Salle Le Diamant	Concert	40	Bruit solidien	30 dB(A)	Modélisation approfondie, essais vibratoires et acoustiques
Le Capitole	Concert	80	Bruit solidien	30 dB(A)	Pas d'étude nécessaire
Université Laval	AFM	100	Vibrations	VC-D (60 dBv)	Modélisation standard, mesure des niveaux ambiants
GMFU Laurier	Microscope	70	Vibrations	VC-A (42 dBv)	Modélisation standard, mesure des niveaux ambiants
CHU Laval	Salle d'angiologie	35	Vibrations	VC-A (60 dBv)	Modélisation standard, mesure des niveaux ambiants

Site	Activité Équipement	Distance* (m)	Sensibilité	Seuil recommandé**	Actions recommandées
INRS	MEB	35	Vibrations	VC-D (42 dBv)	Modélisation approfondie, mesure des niveaux ambiants
Hôpital Saint-François D'Assise	Audiométrie	25	Bruit solidien	25 dB(A)	Modélisation approfondie, mesure des niveaux ambiants
	Microscope AFM	100	Vibrations	VC-D (42 dBv)	

* Distance entre le local sensible et la ligne.

** La valeur seuil est celle conseillée pour l'équipement présentant le plus fort potentiel de risque.

6.4 CHOIX DES SITES D'ÉTUDES ET TRONÇONS HOMOGENES ASSOCIÉS

L'application des critères de définition des tronçons homogènes et des bâtiments représentatifs associés a conduit au choix des sites d'étude présentés dans le tableau ci-après. Les sites très sensibles figurent également dans ce tableau.

Un code couleur est utilisé pour indiquer les informations suivantes : les zones en tunnel, les sites très sensibles et les sites où des essais ont été réalisés – voir ci-après.

Légende :

	Zone en tunnel
	Toute autre zone à sensibilité vibratoire courante
	Site spécifiquement sensible
	Site de mesure des fonctions de transfert sur site

Tableau 4 : Zones d'exposition homogène et sites représentatifs associés

Adresse du site représentatif	Désignation	Activité	Zones	Pk		Longueur (m)
				Début	Fin	
447, rue Mendel	Magasin IKEA	Commerce	Zone 1	10+000	20+760	1760
700, rue Gingras	Maison individuelle	Résidence	Zone 2	20+760	40+027	1615
916, boul. Pie-XII	Logement collectif	Résidence	Zone 3	40+027	40+230	203
3 427, chemin des Quatre-Bourgeois	Logement collectif	Résidence	Zone 4	40+230	41+350	1120
990, avenue de Bourgogne	Grand bâtiment	Résidence				
3 083, chemin des Quatre-Bourgeois	Bâtiment de bureaux	Bureaux	Zone 5	41+350	41+900	550
3 001, chemin des Quatre-Bourgeois	Gare d'autocars	Bureaux	Zone 6	41+900	50+250	550
1 020, avenue Roland-Beaudin	Ctre petite enfance	École, bureaux	Zone 7	50+250	50+550	300
3 000, boul. Hochelaga	Centre Marie-Rollet	École	Zone 8	50+550	60+466	466
1 175, avenue Lavigerie	Bâtiment de Bureaux	Bureaux	Zone 9	60+466	61+070	604
2 875, boul. Laurier	GMF-U Laurier	Soins	Zone 10	61+070	70+550	580
2 705, boul. Laurier	CHU-Laurier	Rech., soins	Zone 11	70+825	70+825	275
2 875, boul. Laurier	GMF-U Laurier	Bureaux	Zone 12	70+700	71+550	725

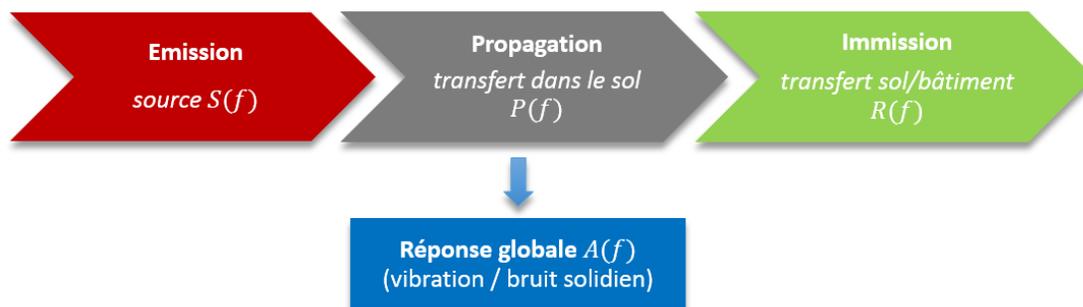
Adresse du site représentatif	Désignation	Activité	Zones	Pk		Longueur (m)
				Début	Fin	
2 431, boul. Laurier	Maison Individuelle	Résidence	Zone 13	71+550	71+740	190
1 100, avenue de la Médecine	P. Agathe-Lacerte	Résidence	Zone 14	71+740	80+300	510
2 325, rue de l'Université	Université Laval P. Alphonse-Desjardins	Recherche	Zone 15	80+300	80+400	100
2 255, rue de l'Université	P. Alphonse-Marie	Résidence	Zone 16	80+400	81+250	850
2 095, boul. René-Lévesque O.	Maison individuelle	Résidence	Zone 17	81+250	90+250	380
2 023, Boul. René-Lévesque O.	Maison individuelle	Résidence	Zone 18	90+250	90+850	600
1 455, boul. René-Lévesque O.	Maison individuelle	Résidence	Zone 19	90+850	91+850	1000
1 235, boul. René-Lévesque O.	Petit immeuble	Résidence				
549, boul. René-Lévesque O.	Maison individuelle	Résidence	Zone 20	91+850	93+300	1450
148, boul. René-Lévesque O.	Maison individuelle	Résidence	Zone 21	93+300	100+600	650
269, boul. René-Lévesque O.	Gd Théâtre du Québec, Conservatoire	Théâtre, enregistrement	Zone 22	100+600	100+850	250
506, boul. René-Lévesque E.	Cinécourses	Cinéma	Zone 23	100+850	101+125	275
525, boul. René-Lévesque E.	Commission du Québec	Bureaux				
1 100, boul. René-Lévesque E	Hilton Québec	Hôtel	Zone 24	101+125	102+300	1375
775, avenue Honoré-Mercier	Hôtel Palace Royal	Hôtel				
751, Côte d'Abraham	Logement collectif	Résidence				
490, rue de la Couronne	INRS	Recherche	Zone 25	102+300	102+500	200
289 QC-175	Logement collectif	Résidence	Zone 26	102+500	110+230	230
187, Autoroute Laurentienne	Benson & Hedges Inc.	Bureaux	Zone 27	110+230	110+700	470
325, rue de la Croix-Rouge	Croix-Rouge	Bureaux	Zone 28	110+700	120+225	275
675, 1 ^{ère} Avenue	Logement collectif	Résidence	Zone 29	120+225	130+350	575
1 042, 1 ^{ère} Avenue	Logement collectif	Résidence	Zone 30	130+350	130+800	450
	CHU St-François-d'Assise	Recherche, soins	Zone 31	130+800	131+100	230
1 042, 1 ^{ère} Avenue	Logement collectif	Résidence	Zone 32	131+100	140+380	580
2 324, 1 ^{ère} Avenue	Maison individuelle	Résidence	Zone 33	140+380	140+700	320
3 020, 1 ^{ère} Avenue	Logement collectif	Résidence	Zone 34	140+700	141+400	700
4 225, 1 ^{ère} Avenue	Maison individuelle	Résidence	Zone 35	141+400	150+450	600
5 560, 1 ^{ère} Avenue	Maison individuelle	Résidence	Zone 36	150+450	160+600	1350
6 576, avenue Isaac-Bédard	Logement collectif	Résidence	Zone 37	160+600	170+700	950
7 860, boul. Henri-Bourassa	Maison individuelle	Résidence				

7. ANALYSE DU RISQUE D'IMPACT EN EXPLOITATION POUR LES SECTIONS EN SURFACE

7.1 MÉTHODES ET HYPOTHÈSES DE MODÉLISATION

7.1.1 Principe de modélisation

Quel que soit le site étudié (sensibilité courante ou spécifique, tronçons en surface ou en tunnel), il est admis que les mécanismes de transmission des vibrations d'origine ferroviaire peuvent être décomposés en trois phases interdépendantes : émission, propagation et émission (cf. figure ci-après).



$$A(f) = S(f) \times P(f) \times R(f)$$

Figure 16 : Principe de la modélisation

Le modèle mis en œuvre repose sur ce principe : à chaque étape correspond un terme qui est déterminé par calcul ou par essai :

- **Étape 1 – Caractérisation du terme d'excitation** : Pour la phase d'exploitation de la ligne de tramway, il s'agit de l'effort équivalent exercé lors du passage de la rame, correspondant à une ligne de force décorrélée de longueur égale à celle de la rame.
- **Étape 2 – Modélisation de la propagation des vibrations dans le sol** : La propagation des vibrations dans le sol, depuis chaque point d'excitation de la ligne de forces jusqu'au pied du bâtiment, est représentée par une mobilité de transfert ponctuelle (c.-à-d. vitesse vibratoire en un point pour une force unitaire appliquée en un autre point). L'ensemble des mobilités de transfert ponctuelles, déterminées pour chaque point d'excitation de la ligne de force, est représenté par une mobilité de transfert linéique représentant le transfert vibratoire d'une ligne de forces unitaires au pied du bâtiment.
- **Étape 3 – Émission (transmission des vibrations entre le sol en pied de bâtiment et les dalles au pied des équipements)** : Les vibrations transmises entre le sol et la structure du bâtiment sont caractérisées par une fonction de transfert vibratoire qui représente le rapport des amplitudes de vitesse entre un point sur plancher à l'intérieur du bâtiment et un point à l'extérieur sur la surface du sol à proximité du bâtiment (pour une source vibratoire extérieure).

En appliquant le principe décrit précédemment, le niveau de vitesse vibratoire sur le plancher d'un bâtiment est estimé à l'aide de la relation suivante :

$$L_V = L_F + FT1 + FT2 + FT3 \quad (1)$$

Avec :

- L_V Niveau de vitesse particulière sur le plancher, en dB réf. 5×10^{-8} m/s
- L_F Niveau de densité de force appliquée au passage d'une rame, exprimé en dB réf. $1 \text{ N/m}^{1/2}$
- $FT1$ Mobilité de transfert linéique, d'un effort appliqué au passage jusqu'à la vitesse particulière sur le sol près des fondations du bâtiment, en dB réf. $5 \times 10^{-8} \text{ (m/s)/(N/m}^{1/2})$
- $FT2$ Différence des niveaux vibratoires entre le sol et les fondations du bâtiment, en dB réf. 1
- $FT3$ Différence des niveaux vibratoires entre les fondations d'un bâtiment et le plancher (RDC), en dB réf. 1

7.1.2 Méthode d'évaluation du bruit solidien

Le bruit solidien est généré par le mouvement des parois d'un local sous l'action des vibrations provenant du sol, à l'image d'une membrane de haut-parleur. Ce bruit est rayonné par la paroi et se déduit des caractéristiques propres de la paroi (facteur de rayonnement), du local (temps de réverbération) et des vibrations de la paroi (amplitudes, fréquences).

Pour les sites de sensibilité courante, il est usuel d'utiliser des relations dans lesquelles les paramètres prennent des valeurs génériques. Ces relations sont vérifiées statistiquement dans le cas courant. Elles fournissent une relation directe entre le niveau de pression (acoustique) et le niveau de vitesse vibratoire observé au centre du plancher.

Dans cette étude nous utilisons les relations fournies par Alten [9], telles que définies ci-dessous.

$$L_p = 15.75 L_v, A + 0.6 \quad (2a)$$

$$L_p = 19.88 L_v, A + 0.47 \quad (2b)$$

où L_v est le niveau vibratoire global en milieu de plancher, calculé après application de la pondération A. La relation (2a) est utilisée pour les bâtiments de structure en béton, et la relation 2b pour les bâtiments de structure en bois. Cette approche ne peut cependant pas être appliquée à des cas particuliers (Grand Théâtre, etc.). Dans de telles situations, un calcul détaillé du bruit solidien est nécessaire.

7.1.3 Caractérisation expérimentale du spectre d'excitation

En phase exploitation, les vibrations proviennent des mécanismes d'interaction entre le matériel roulant et la voie dans la zone de contact roue-rail. Le spectre de force dépend du type de pose de voie, de la présence d'appareil de voie, des caractéristiques du matériel roulant, de sa vitesse et du niveau d'irrégularité de la surface de contact entre les rails et les roues.

Le terme d'excitation à utiliser est le spectre de densité de force appliqué sur le radier au passage d'une rame. Il s'agit de la force totale appliquée lors du passage complet de la rame, divisée par la longueur de la rame.

Ce terme source est généralement déterminé expérimentalement comme indiqué dans le guide « FTA ». Il convient alors de se baser sur une campagne d'essais dont les caractéristiques de site (type de voie), de matériel roulant (type de train) et d'exploitation (vitesse de passage) sont les plus proches possible de la situation envisagée par le projet.

Une estimation d'un spectre d'excitation a récemment été obtenue à l'aide d'une campagne de mesures effectuées en septembre 2019 à Lyon. Le site choisi pour ces essais comporte une voie classique (sans système de mitigation notable) sur laquelle passe un tramway de type CITADIS 300.

La caractérisation de la densité de force comporte deux étapes de mesures et trois étapes de post-traitement, selon une procédure suivant les points ci-après :

- Mesure d'un ensemble de mobilités ponctuelles entre un impact au marteau instrumenté sur la voie (points F5 à F-5) et la vitesse vibratoire sur le sol à 5, 7 et 9m de l'axe de la voie (points c1, c2 et c3 indiqués sur la Figure 18);
- Mesure des vitesses vibratoires lors du passage d'un tramway sur la voie (6 passages) aux mêmes points c1, c2 et c3;
- Calcul de la mobilité linéique $FT1$, entre la voie et les capteurs en aval en utilisant les mobilités ponctuelles mesurées à l'étape 1 (loi de décroissance dans le sol calculé comme au paragraphe 7.2.4, voir Figure 17);
- Calcul du spectre de niveau de vitesse L_{Vsol} , généré par le passage du tramway (moyenne sur les 6 passages, voir Figure 17);
- Pour chaque capteur c1 à c3, calcul de la densité de force L_F à partir des mobilités linéiques et des niveaux de vitesse calculés aux étapes 3 et 4 ($L_F = L_{Vsol} - FT1$).

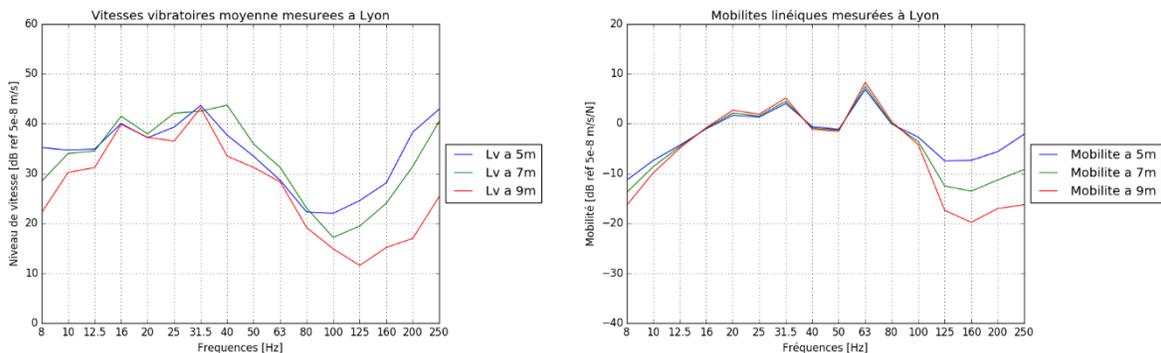


Figure 17 : Résultats intermédiaires de la campagne de mesure de niveau d'excitation
 Gauche : vitesses moyennes relevées aux passages des rames
 Droite : mobilités linéiques calculées à l'aide des mobilités ponctuelles mesurées sur site

Le spectre de densité de force final est obtenu en moyennant les spectres obtenus aux capteurs c1, c2 et c3. La plage de variation indiquée sur la Figure 19 correspond à l'écart type entre les mesures.

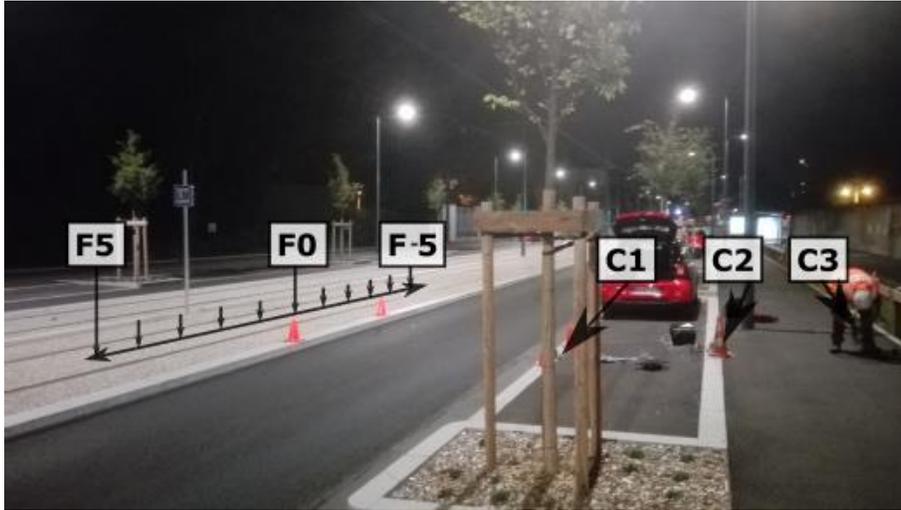


Figure 18 : Photos de la configuration de la campagne d'essais de caractérisation de l'excitation, Lyon, (Septembre 2019)

En parallèle à cet essai, il a été décidé d'utiliser également un spectre de densité de force (noté FDL) présenté dans le guide « FTA ». Ce spectre est donné avec une plage de variation pour un matériel roulant de type Tramway (Light Rail) circulant à 65 km/h, et est considéré obtenu pour pose de voie classique.

L'ensemble des spectres de densité de force décrits ci-dessus, retranscrits pour des vitesses de passage de 30 et 50 km/h, sont représentés sur la figure ci-dessous.

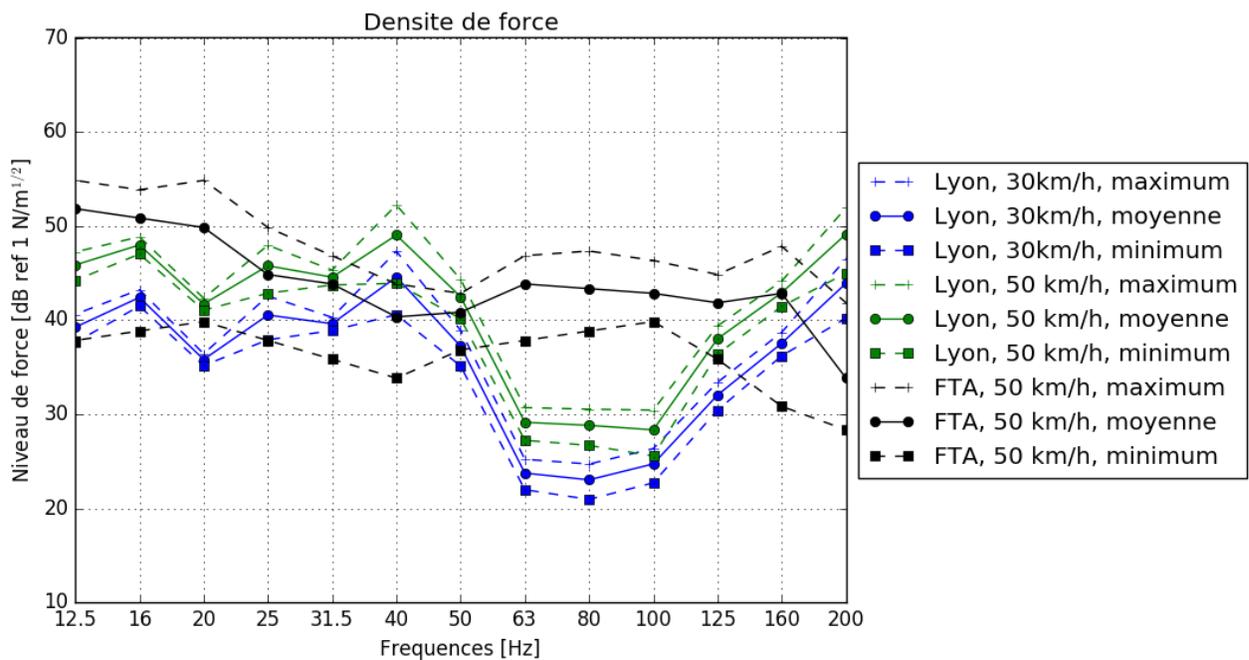


Figure 19 : Spectre densité de force appliqué sur le radier de voie pour une rame selon [1]

Les termes d'excitation utilisés par la suite lors de l'estimation des niveaux vibratoires et de bruit solidien dans les sites avoisinant le tracé sont :

- Pour les résultats présentés en conclusion, les courbes moyennes obtenues suite aux mesures faites à Lyon, calculées en fonction de la vitesse maximale du tronçon étudié, et majorées de 3dB afin de tenir compte d'un état d'usure moyen de la voie;
- Pour les résultats présentés en annexe, le spectre maximal donné par le guide FTA.

7.2 ESSAIS DE CARACTÉRISATION SUR SITE

7.2.1 Principe de caractérisation des transferts vibratoires dans le sol

Les niveaux vibratoires transmis dans un bâtiment dépendent de la propagation des vibrations dans le sol. La forme linéique de la source (passage d'une rame de tramway) amène à caractériser le transfert vibratoire entre une ligne de force au niveau de la future ligne et le sol en surface, au pied du bâtiment.

Dans le cas d'un site de sensibilité courante, pour un tronçon de voie en surface, la méthode basée sur la mesure d'une loi de décroissance dans le sol est utilisée. Cette méthode s'appuie sur la mesure de mobilités ponctuelles de transfert entre un impact en surface et un récepteur en surface, à différentes distances du point d'excitation. Ces mobilités de transfert ponctuelles sont ensuite combinées pour déterminer la mobilité de transfert linéique.

Quelle que soit l'approche employée, le calcul de la mobilité linéique à partir des mobilités ponctuelles doit être réalisé avec la relation (3), donnée au paragraphe 6.2.3.

7.2.2 Déroulement des essais

La campagne d'essais sur site s'est déroulée en juillet 2019, et a permis de caractériser 16 profils de sol différents et 10 fonctions de transfert entre le sol et les bâtiments typiques de la ville de Québec.

Les sites instrumentés ont été choisis en fonction de leur représentativité et des contraintes propres aux essais. Ces contraintes sont, pour les mesures du transfert des vibrations entre le sol et les bâtiments, l'accessibilité depuis la façade exposée aux planchers du sous-sol, du rez-de-chaussée et du premier étage. Pour les mesures de décroissance dans le sol, les contraintes sont principalement un niveau vibratoire ambiant faible; le site d'essai devait donc être éloigné des axes routiers à trafic continu, et l'absence d'élément perturbant la propagation des vibrations (espace plat et sans construction à proximité directe). Les mesures de décroissance dans le sol ont été réalisées principalement au centre de stationnements.

Les positions des points de mesures sont indiquées dans le **Tableau 4** (bâtiment instrumenté pour la mesure des fonctions de transfert sol-bâtiment) et **Figure 24** (décroissance dans le sol).

Ces essais ont été entrepris à l'aide de capteurs vibratoires posés au sol (voir **Figure 20**). Le moyen d'excitation utilisé est un marteau d'impact instrumenté permettant de mesurer le niveau de force injecté lors de l'essai.

Le couplage de ces deux types d'instruments permet d'estimer des mobilités de transfert ponctuelles avec une grande précision. Ce type de mesure est utilisé pour caractériser l'ensemble des configurations

nécessaires à l'analyse des transferts vibratoires entre le sol, à une certaine distance du bâtiment, et les locaux visés par l'étude d'impact.

Les différents instruments utilisés lors de la campagne de mesure sont illustrés sur les images ci-après.



Figure 20 : Illustration des moyens d'essais utilisés lors de la campagne de mesures (juillet 2019)

7.2.3 Méthode d'évaluation de la mobilité linéique

La mobilité de transfert linéique est estimée en intégrant l'ensemble des mobilités de transfert ponctuelles (point à point) représentant chaque chemin de propagation entre la ligne de force et la surface du sol en pied de bâtiment. Connaissant toutes les mobilités de transfert ponctuelles, la mobilité de transfert linéique se détermine avec la relation suivante :

$$FT1 = \sqrt{\sum Y_i^2 dx_i} \quad (3)$$

Où Y_i et dx_i sont respectivement la mobilité de transfert ponctuelle entre la source i et le point en surface du sol, et la longueur du segment de forces sur lequel s'applique la force ponctuelle considérée (voir schéma ci-après).

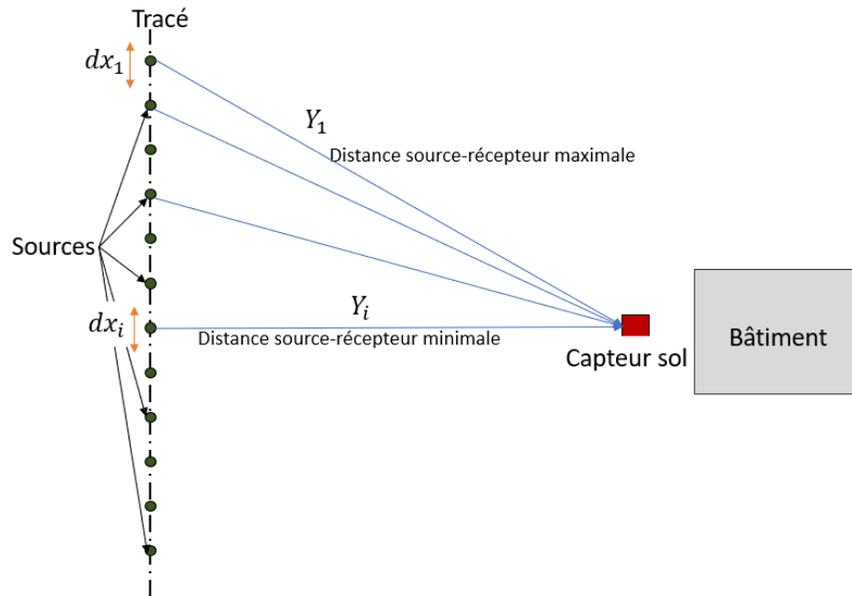


Figure 21 : Représentation de la source linéique et des mobilités de transfert ponctuelles associées (vue en plan)

7.2.4 Méthode d'évaluation de la loi de décroissance dans le sol

Suivant la méthodologie préconisée dans le Guide FTA, les mobilités de transfert ponctuelles doivent être évaluées à l'aide d'une loi de décroissance dans le sol issue d'essais sur site. Dans le cas des exemples traités dans ce document, la loi de décroissance est prise sous la forme :

$$|v| = \alpha D^\beta \tag{4}$$

Où $|v|$ est l'amplitude de la vitesse particulière mesurée à la distance D ; α et β sont deux coefficients à estimer à chaque fréquence.

Les essais sur site doivent permettre d'interpoler l'ensemble des mobilités de transfert ponctuelles. Pour cela, la distance entre la source instrumentée et le capteur le plus éloigné doit être supérieure ou égale à la distance maximale entre les forces de la ligne de force et le point en pied de bâtiment (voir schéma ci-dessous).

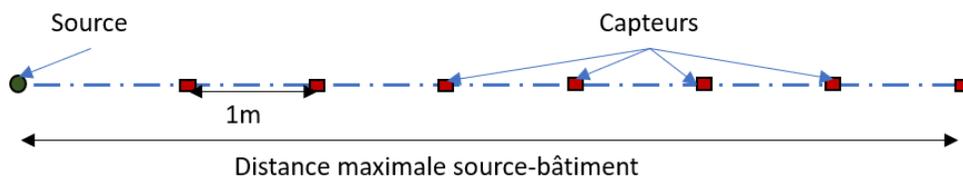


Figure 22 : Configuration des essais de décroissance dans le sol

7.2.5 Mobilités de transfert mesurées

Un exemple de jeu de mobilités de transfert mesurées sur un des sites est présenté sur la figure ci-dessous. Les mesures ont été faites pour des distances source-récepteur allant de 1 à 30 mètres, par pas de 1 mètre.

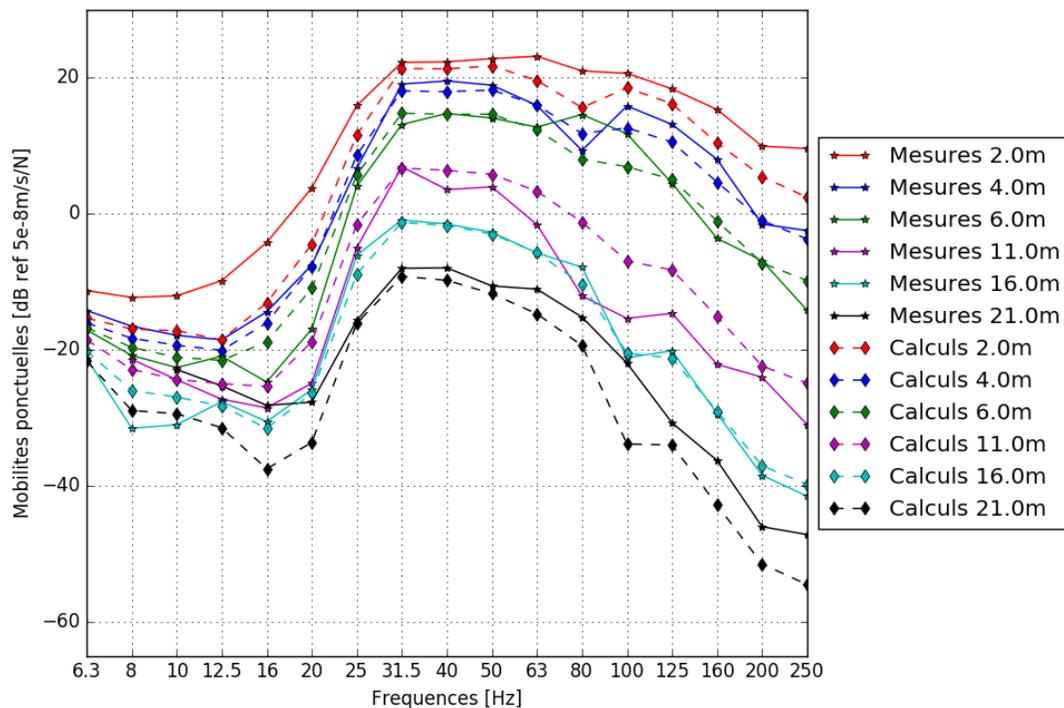


Figure 23 : Exemple de décroissance dans le sol calculée à partir des essais effectués sur le site 3

Les mobilités de transfert linéiques sont calculées à partir des données de décroissance dans le sol, telles que celles présentées ci-dessus (site 3), et en appliquant la relation (3). Les mobilités de transfert linéiques ainsi calculées à 12 m de la ligne, pour l'ensemble des sites d'essai sont présentées **Figure 25**. La longueur de la ligne de force équivaut à celle du tramway à savoir 40 m. Les positions des sites de mesure des décroissances dans le sol sont illustrées ci-dessous.

D'après les résultats présentés ci-dessus, le comportement du sol est relativement homogène sur un nombre important de sites. Sur le haut et le bas du spectre, l'ensemble des sites présentent des réponses vibratoires similaires. Sur la partie centrale du spectre ([20-80]Hz), les sites présentent des différences notables, en raison vraisemblablement d'une différence de profondeur la couche rigide du sol.

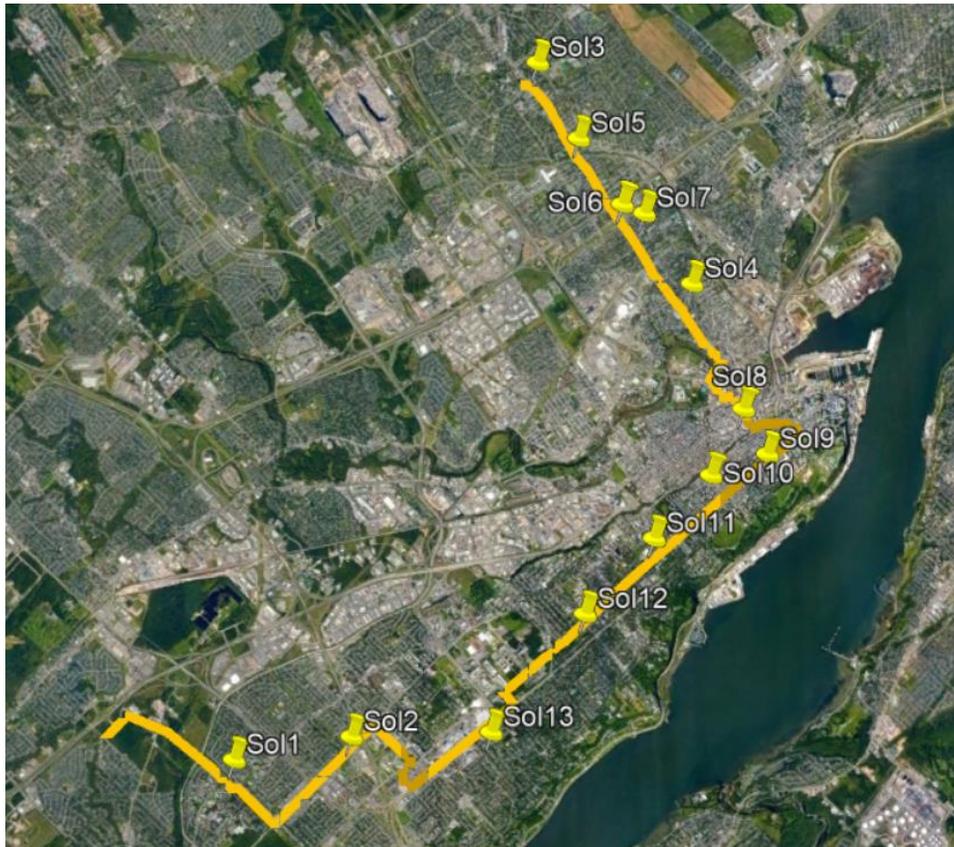


Figure 24 : Position des emplacements de mesure de décroissance dans le sol effectuée lors de la campagne d'essais (juillet 2019)

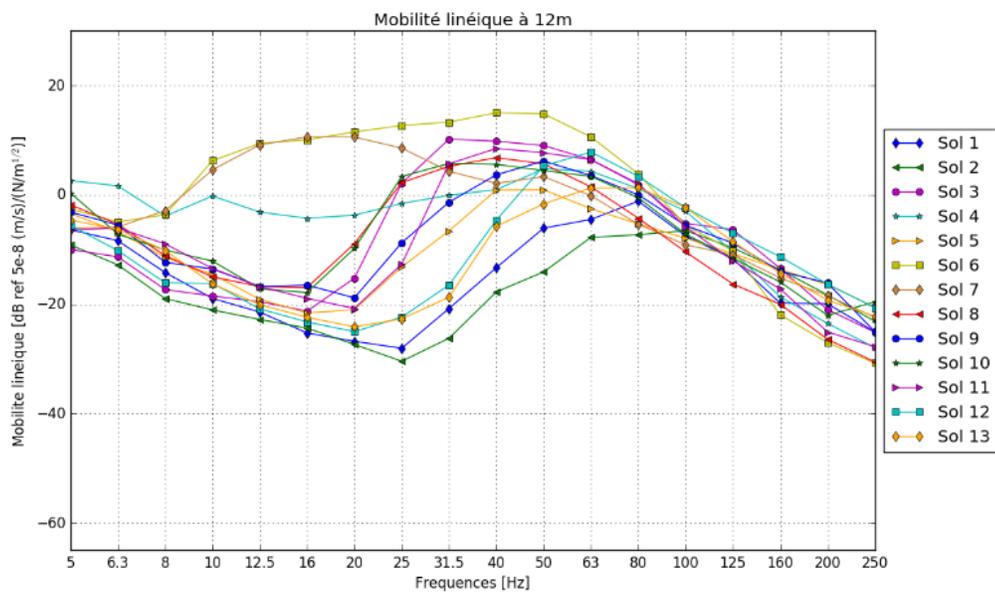


Figure 25 : Mobilités linéiques FT1 calculées à 12 m (bas)

À partir des mobilités ponctuelles estimées sur les sites 1 à 13, indiqués sur le tracé du tramway dans la vue aérienne (haut)

La **figure 24** permet de vérifier que les mobilités de transfert linéiques sont comparables dans chacun des secteurs délimités par les zones de couleur rouge, verte et bleue.

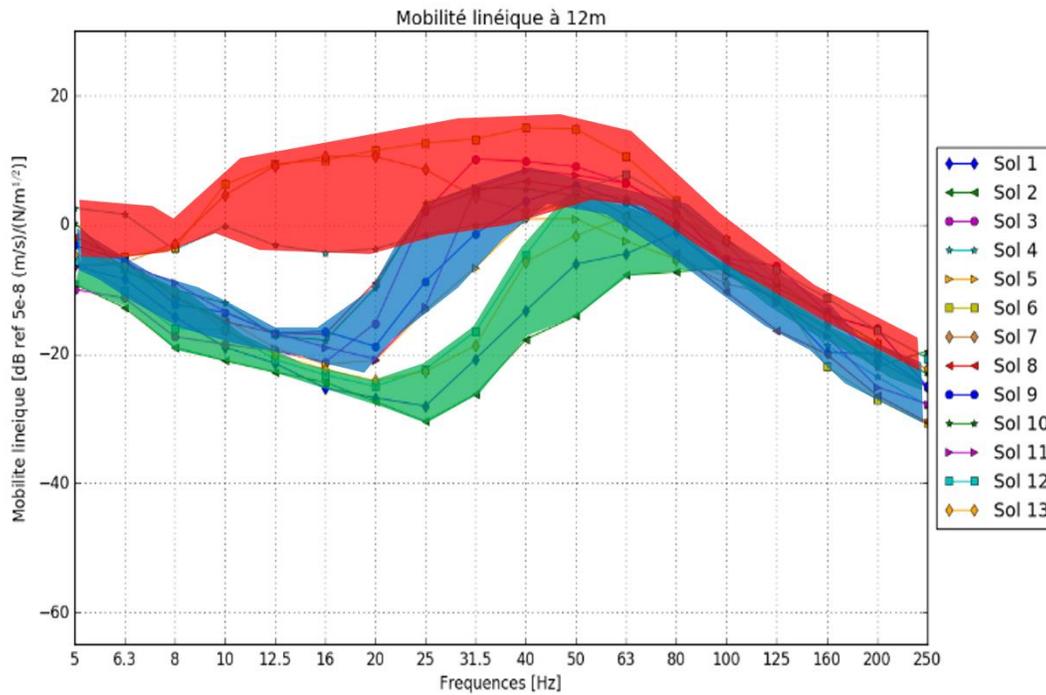
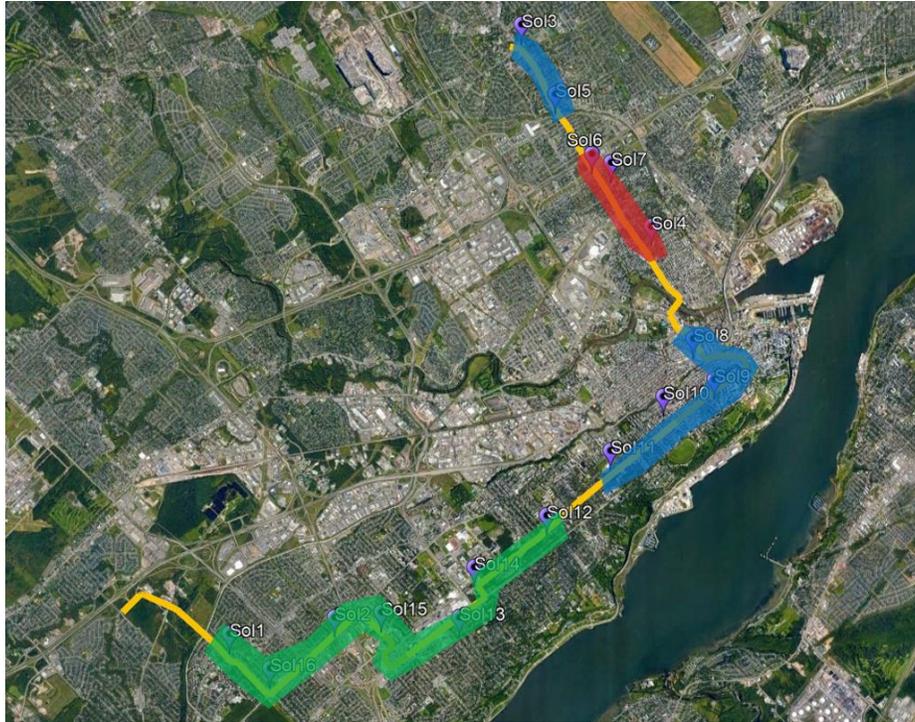


Figure 26 : Variabilité des mobilités de transfert linéiques selon le secteur considéré

7.3 CARACTÉRISATION DE LA RÉPONSE VIBRATOIRE DES BÂTIMENTS

7.3.1 Protocole des essais

La mesure de la fonction de transfert entre le sol et le bâtiment (FT3) a été réalisée selon le protocole suivant :

- Trois capteurs de vibrations (accéléromètres) sont positionnés aux emplacements suivants :
 - sur le sol, près du bâtiment
 - sur la fondation ou un élément porteur de la structure
 - sur le plancher, en milieu de portée
- Une excitation est réalisée à l'aide d'un marteau d'impact à une distance raisonnable du bâtiment (6 à 8 mètres de la façade).

La position des capteurs et du point d'excitation est illustrée sur la figure suivante.

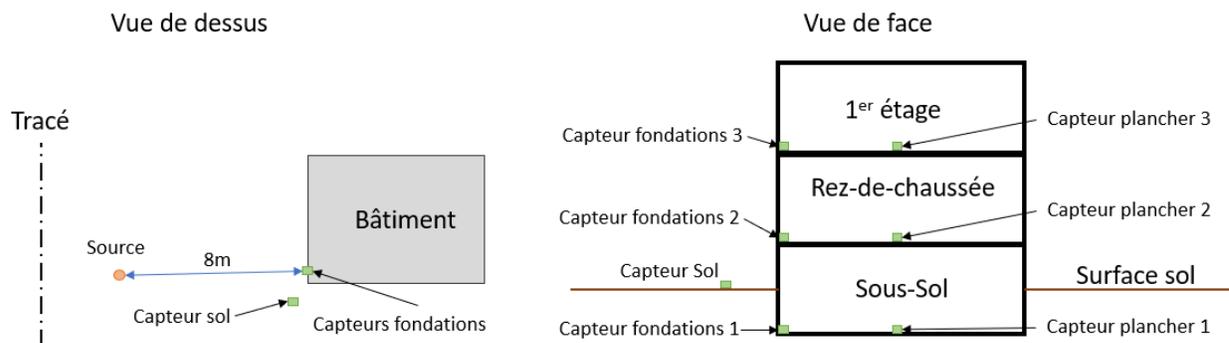


Figure 27 : Configuration des essais de mesure des fonctions de transfert sol/bâtiment

Les fonctions de transfert déterminées sont :

- FT2 qui est le rapport entre les vitesses vibratoires mesurées sur la fondation et au sol en pied de bâtiment;
- FT3 qui est le rapport entre les vitesses vibratoires mesurées sur le plancher et la fondation, au même étage.

La fonction de transfert globale du bâtiment (notée FTb) est donnée par la somme des deux fonctions de transfert FT2 et FT3. Elle peut également être mesurée, donnant alors le rapport entre les vitesses particulières mesurées sur le plancher et au sol à l'extérieur du bâtiment.

7.3.2 Résultats des essais

Les essais ont été réalisés pour deux typologies de bâtiments :

- **Type 1** : petits bâtiments à ossature de bois, reposant sur un soubassement (étage semi-enterré ou sous-sol) en béton;
- **Type 2** : grands bâtiments en béton, reposant généralement sur des stationnements en sous-sol.

Les fonctions de transfert mesurées (FTb, FT2 et FT3) pour les deux types de bâtiments sont données sur la figure ci-dessous.

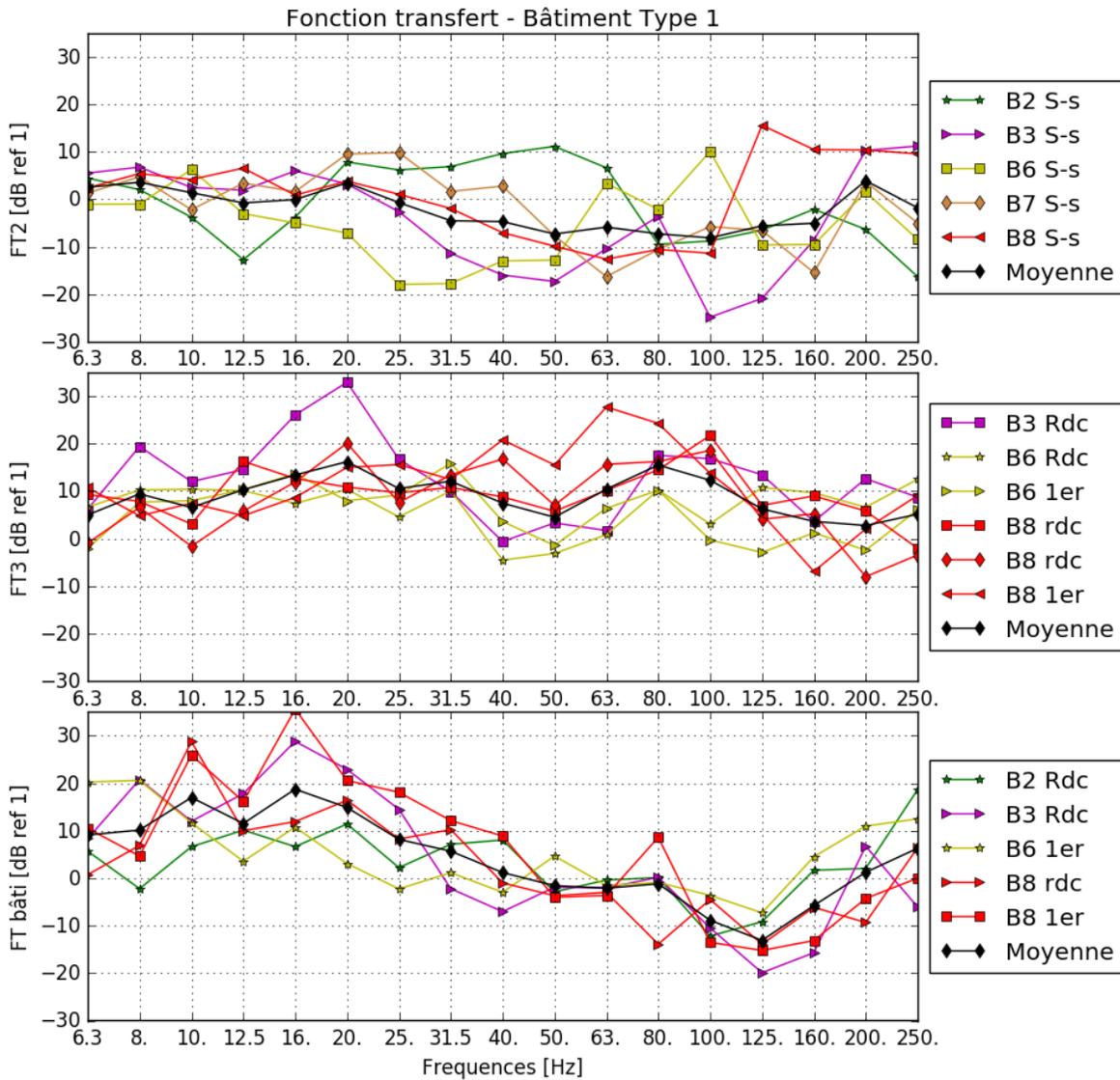


Figure 28 : Fonctions de transfert sol/bâtiment (FT2, FT3 et FTb) mesurées pour plusieurs bâtiments de type 1

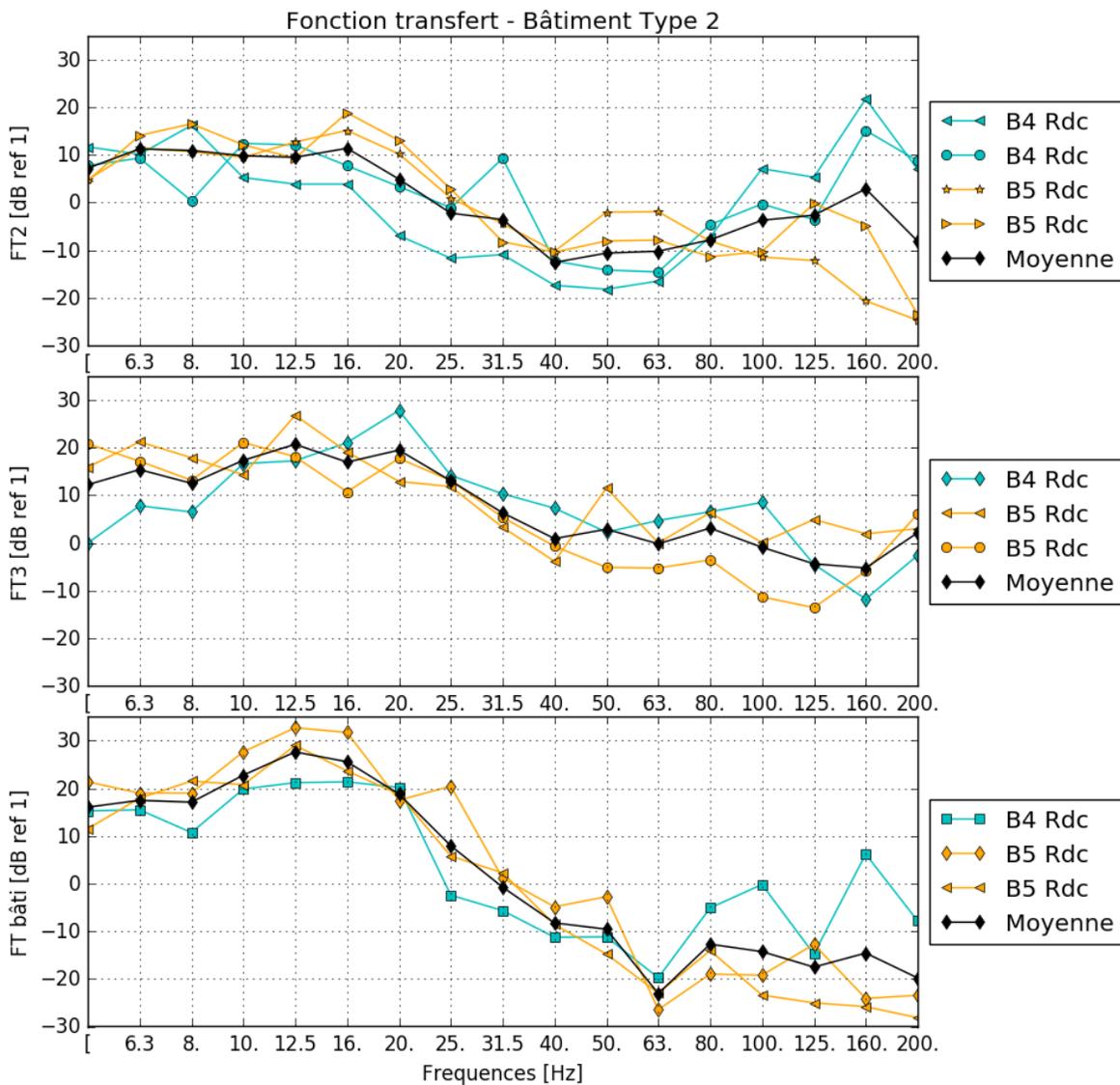


Figure 29 - Fonctions de transfert sol/bâtiment (FT2, FT3 et FTb) mesurées pour plusieurs bâtiments de type 2

Ces résultats permettent de confirmer des comportements vibratoires bien distincts entre les deux types de bâtiments, selon si l'ossature du bâtiment est en bois ou en béton. En revanche, pour chaque type, les fonctions de transfert mesurées sont relativement homogènes.

Les courbes utilisées pour l'estimation des niveaux vibratoires dans les bâtiments sont les moyennes indiquées sur les figures, majorées de 3dB.

7.4 RÉSULTATS ET IMPACT POUR LES SECTIONS EN SURFACE

Le **Tableau 5** fournit les résultats des simulations des niveaux de bruit solidien pour les sites de sensibilité courante au voisinage des sections de la ligne en surface.

Le code couleur utilisé dans la colonne de droite du tableau de résultats présenté ci-dessous pour indiquer le niveau de risque d'impact est le suivant :

	Risque d'impact nul ou très faible
	Risque d'impact modéré
	Risque d'impact fort
	Non calculé à ce jour

Tableau 5 : Synthèse des niveaux des niveaux de bruits solidiens estimés sans moyen de mitigation sur le tracé du tramway de la ville de Québec.

Adresse	Distance à la voie	Zones	Long.	Type bâti	Profil sol	Vitesse	Val. Cible	Niveau Bruit solidien dB(A)
						(km/h)	(dB(A))	
447, rue Mendel	30	Zone 1	1 760	3	Sol 1	70	40	Indéfini
700, rue Gingras	26	Zone 2	1 615	1	Sol 1	70	35	31.0
916, boul. Pie-XII	23	Zone 3	203	1	Sol 1	50	35	31.0
3 427, chemin des Quatre-Bourgeois	13	Zone 4	1 120	1	Sol 2	50	35	35.0
990, avenue de Bourgogne	15			2	Sol 2	50	35	22.0
3 083, chemin des Quatre-Bourgeois	13	Zone 5	550	2	Sol 2	50	40	23.0
3 001, chemin des Quatre-Bourgeois	13	Zone 6	550	1	Sol 2	50	40	35.0
1 020, avenue Roland-Beaudin	8	Zone 7	300	1	Sol 14	50	40	49.5
3 000, boul. Hochelaga	33	Zone 8	466	2	Tunnel	50	40	Indéfini
1 175, avenue Lavigerie	18	Zone 9	604	2	Tunnel	50	40	Indéfini
2 875, boulevard Laurier	50	Zone 10	580	2	Sol 13	50	VC-A	3.0
2 705, boul. Laurier	50	Zone 11	275	S.S.	Sol 13	30	VC-D*	Indéfini
2 875, boul. Laurier	50	Zone 12	725	2	Sol 13	50	40	3.0
2 431, boul. Laurier	45	Zone 13	190	1	Sol 13	50	35	5.5
1 100, avenue de la Médecine	25	Zone 14	510	2	Sol 15	40	35	24,5
2 325, rue de l'Université	20	Zone 15	100	S.S.	Sol 15	30	VC-G*	Indéfini
2 255, rue de l'Université	28	Zone 16	850	2	Sol 15	40	35	22.5
2 095, boul. René-Lévesque O.	12	Zone 17	380	1	Sol 12	70	35	39.0
2 023, boul. René-Lévesque O.	13	Zone 18	600	1	Sol 12	30	35	34.0
1 455, boul. René-Lévesque O.	12	Zone 19	1 000	1	Sol 11	50	35	35.5
1 235, boul. René-Lévesque O.	11			1	Sol 11	50	35	36.5
549, boul. René-Lévesque O.	12	Zone 20	1 450	1	Sol 10	50	35	37.0
148, boul. René-Lévesque O.	10	Zone 21	650	1	Tunnel	70	35	Indéfini
269, boul. René-Lévesque O.	25	Zone 22	250	S.S.	Tunnel	70	25*	Indéfini
506, boul. René-Lévesque E.	16	Zone 23	275	S.S.	Tunnel	70	30**	Indéfini
525, boul. René-Lévesque E.	24							Indéfini

Adresse	Distance à la voie	Zones	Long.	Type bâti	Profil sol	Vitesse	Val. Cible	Niveau Bruit solidien dB(A)
						(km/h)	(dB(A))	
1 100, boul. René-Lévesque E.	20			2	Tunnel	70	35	Indéfini
775, avenue Honoré-Mercier	0	Zone 24	1 375	2	Tunnel	50	35	Indéfini
751 Côté d'Abraham	6			3	Tunnel	50	35	Indéfini
490, rue de la Couronne	8	Zone 25	200	S.S.	Tunnel	50	VC-F*	Indéfini
289, QC-175	8	Zone 26	230	1	Sol 8	50	35	38.5
187, autoroute Laurentienne	15	Zone 27	470	2	Sol 8	50	40	31.5
325, rue de la Croix-Rouge	9	Zone 28	275	1	Sol 8	50	40	37.5
675, 1 ^{ère} Avenue	8	Zone 29	575	1	Sol 4	30	35	36.0
1 042, 1 ^{ère} Avenue	7	Zone 30	450	1	Sol 4	30	35	37.0
CHU Saint François d'Assise	10	Zone 31	230	S.S.	Sol 4	30	VC-D*	Indéfini
1 042, 1 ^{ère} Avenue	7	Zone 32	580	1	Sol 4	30	35	37.0
2 324, 1 ^{ère} Avenue	17	Zone 33	320	1	Sol 7	30	35	30.5
3 020, 1 ^{ère} Avenue	13	Zone 34	700	1	Sol 7	50	35	36.0
4 225, 1 ^{ère} Avenue	22	Zone 35	600	1	Sol 6	50	35	34.0
5 560, 1 ^{ère} Avenue	14	Zone 36	1 350	1	Sol 5	50	35	35.0
6 576, avenue Isaac-Bédard	13	Zone 37	950	1	Sol 5	50	35	36.0
7 860, boul. Henri-Bourassa	17			1	Sol 3	50	35	32.5

* Les niveaux de sensibilité des sites spécifiquement sensibles sont détaillés au chapitre 8.

** Site n'ayant pas fait l'objet d'une visite.

7.5 ANALYSE ET CONCLUSION DES NIVEAUX VIBRATOIRES ESTIMÉS SANS MITIGATION

Les simulations dans les bâtiments d'usage courant situés le long du tracé en surface (18,9 km) indiquent que les niveaux de vibration et de bruit solidien simulés en considérant une pose de voie classique sans dispositif de mitigation des vibrations, sont souvent inférieurs aux valeurs limites fixées. Cela concerne l'ensemble des bâtiments sur un linéaire de 15 km (soit 80 % de la longueur totale de voie étudiée).

Il existe quelques zones où les seuils sont dépassés. Cependant, les dépassements sont souvent inférieurs à 1dB et n'excèdent pas 3,5dB. Aucun site étudié ne présente de risque d'impact fort.

Le dépassement modéré des critères sur certains tronçons, montre qu'il est nécessaire de prévoir des solutions usuelles de pose de voie ferrée permettant d'atténuer à la source les émissions vibratoires.

Par comparaison avec la situation d'autres projets de tramway récents, en France notamment, les résultats indiquent un faible risque d'impact lié aux vibrations générées en phase d'exploitation du tramway, en raison principalement d'une distance entre les bâtiments et le tracé relativement grande. Aucun secteur problématique n'a été identifié.

8. MESURES DE MITIGATION DES VIBRATIONS

8.1 DÉFINITION DE SOLUTIONS DE MITIGATION APPROPRIÉES

Pour les sites où les valeurs cibles sont dépassées, il est nécessaire d'être en mesure de proposer un ou plusieurs moyens de réduction des vibrations. Il pourra s'agir :

- De mesures d'évitement (exemple, éloignement du tracé vis-à-vis d'un site ou un secteur très sensible, relocalisation d'un équipement très sensible dans un local éloigné du projet);
- De mesures de réduction (mise en place de poses de voie anti-vibratile, réduction de la vitesse);
- De mesures particulières d'entretien des états de surface des rails et des roues (par des opérations régulières de meulage du rail et de reprofilage des roues).

Dans les cas courants d'insertion urbaine et de sensibilité des bâtiments aux vibrations, la mesure adoptée le plus souvent est la mise en place de poses de voie anti-vibratiles aux propriétés d'atténuation appropriées. Le risque d'impact résiduel après mise en place de ces mesures aujourd'hui éprouvées est généralement faible.

Des exemples de poses de voie utilisées dans un projet de tramway sont illustrés ci-après. Les solutions présentées varient de la pose simple de semelle souple sous le rail, à la pose de voie la plus performante pour l'atténuation des vibrations constituée d'une dalle flottante sur plots résilients.

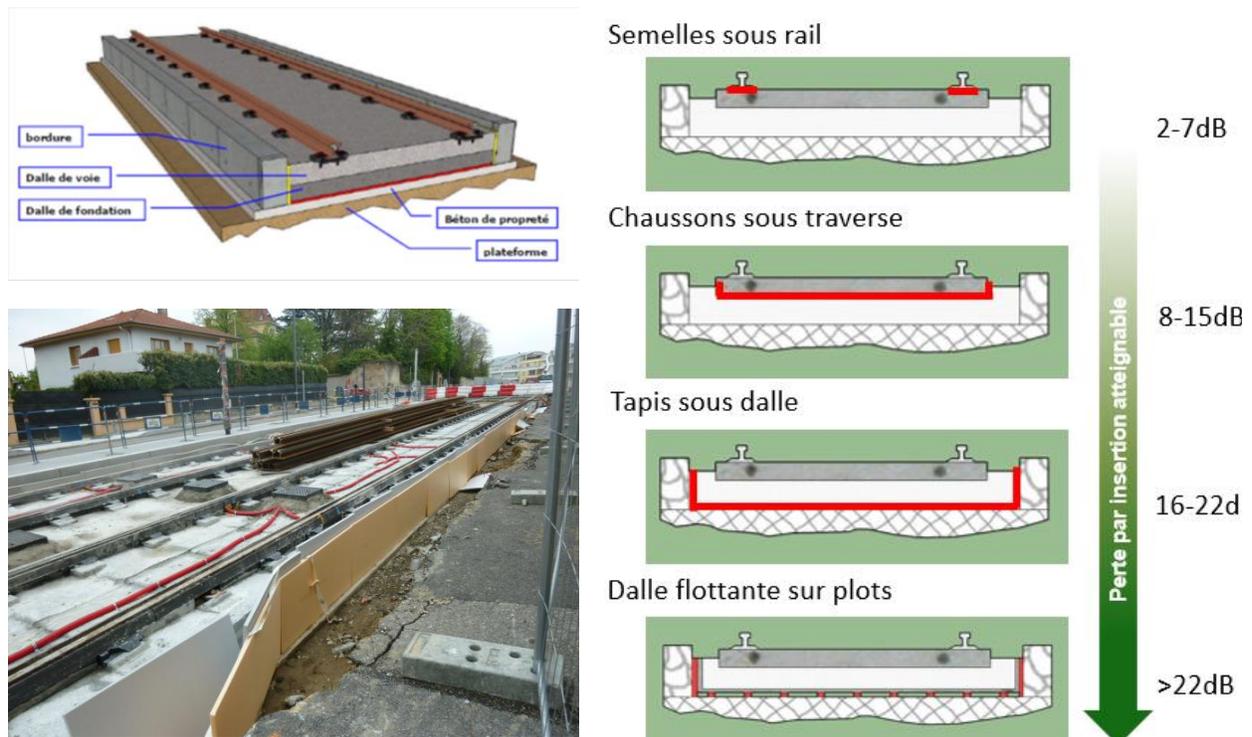


Figure 30 : Schéma de principe des moyens de mitigation usuels
(dalle flottante à gauche et échelle de performance à droite)

Bas gauche : réservation prévue pour une dalle flottante lors de la phase de construction

Dans la présente étude d’impact, trois types de pose de voie anti-vibratile, fréquemment utilisés pour les lignes de tramway, sont envisagés et simulés.

Pour cela, les poses de voie anti-vibratiles sont comparées à une pose de voie similaire, ne contenant aucun système de mitigation. La différence de niveaux de vitesses vibratoires obtenue lors d’une modélisation permet de définir les pertes par insertion qu’amènent ces systèmes de mitigation. Ces pertes par insertion sont appliquées aux résultats obtenus sans mesure de mitigation, pour déduire les nouveaux jeux de résultats après traitement des vibrations à la voie.

Les trois types de pose de voie modélisés sont :

- Voie standard avec des semelles sous rail assouplies;
- Voie sur une dalle flottante reposant sur un tapis de matériau résilient de 15mm d’épaisseur;
- Voie sur une dalle flottante reposant sur un tapis très souple de matériau résilient de 25 mm d’épaisseur.

Les courbes de pertes par insertion calculées sont illustrées sur la figure ci-dessous.

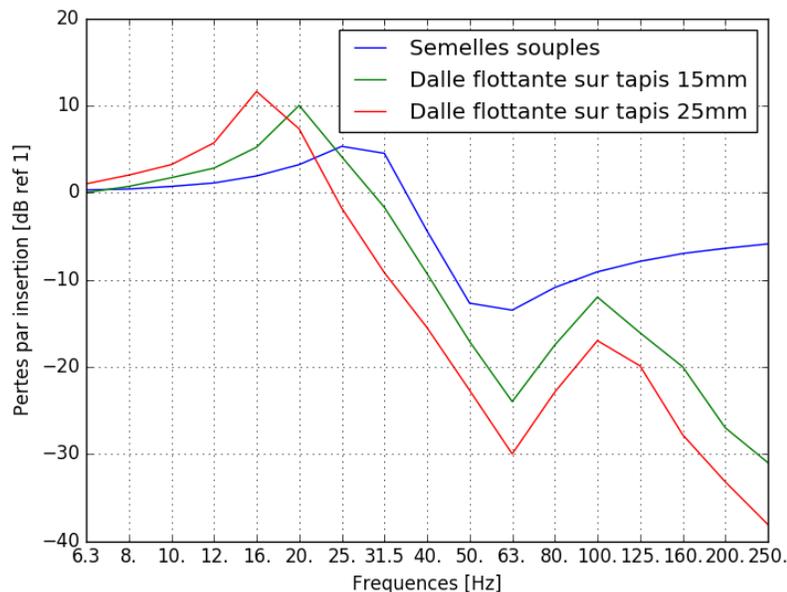


Figure 31 : Pertes par insertion calculées pour trois types de pose de voie couramment utilisés pour du tramway.

8.2 RÉSULTATS DE SIMULATIONS AVEC PRISE EN COMPTE DES MESURES DE MITIGATION

Une synthèse des résultats obtenus après mise en place des mesures de mitigation est présentée dans le tableau ci-après.

Un code couleur est utilisé dans la colonne de droite du tableau pour indiquer le type de pose de voie retenu. Ce code est le suivant :

	Pose de voie sans dispositif anti-vibratile
	Pose de voie avec semelles sous rail assouplies
	Pose de voie sur dalle flottante, tapis de 15mm
	Pose de voie sur dalle flottante, tapis de 25mm
	Calcul non réalisé à ce jour

Tableau 6 : Synthèse du risque d'impact résiduel et pose de voie anti-vibratile préconisée

Adresse	Distance à la voie	Zones	Long.	Type bâti	Profil sol	Vitesse (km/h)	Valeur cible (dB(A))	Niveau Bruit solidien dB(A)
447, rue Mendel	30	Zone 1	1760	3	Sol 1	70	40	Indéfini
700, rue Gingras	26	Zone 2	1615	1	Sol 1	70	35	31.0
916, boulevard Pie-XII	23	Zone 3	203	1	Sol 1	50	35	31.0
3 427, chemin des Quatre-Bourgeois	13	Zone 4	1120	1	Sol 2	50	35	32.5
990, avenue de Bourgogne	15			2	Sol 2	50	35	22.0
3 083, chemin des Quatre-Bourgeois	13	Zone 5	550	2	Sol 2	50	40	23.0
3 001, chemin des Quatre-Bourgeois	13	Zone 6	550	1	Sol 2	50	40	35.0
1 020, avenue Roland-Beaudin	8	Zone 7	300	1	Sol 14	50	40	35.5
3 000, boul. Hochelaga	33	Zone 8	466	2	Tunnel	50	40	Indéfini
1 175, avenue Lavigerie	18	Zone 9	604	2	Tunnel	50	40	Indéfini
2 875, boulevard Laurier	50	Zone 10	580	2	Sol 13	50	VC-A	Indéfini
2 705, boul. Laurier	50	Zone 11	275	S.S.	Sol 13	30	VC-D*	Indéfini
2 875, boul. Laurier	50	Zone 12	725	2	Sol 13	50	40	3.0
2 431, boul. Laurier	45	Zone 13	190	1	Sol 13	50	35	5.5
1 100, avenue de la Médecine	25	Zone 14	510	2	Sol 15	40	35	24.5
2 325, rue de l'Université	20	Zone 15	100	S.S.	Sol 15	30	VC-G*	Indéfini
2 255, rue de l'Université	28	Zone 16	850	2	Sol 15	40	35	22.5
2 095, boul. René-Lévesque O.	12	Zone 17	380	1	Sol 12	70	35	27.5
2 023, boul. René-Lévesque O.	13	Zone 18	600	1	Sol 12	30	35	34.0
1 455, boul. René-Lévesque O.	12	Zone 19	1000	1	Sol 11	50	35	33.5
1 235, boul. René-Lévesque O.	11			1	Sol 11	50	35	34.0
549, boul. René-Lévesque O.	12	Zone 20	1450	1	Sol 10	50	35	35.0
148, boul. René-Lévesque O.	10	Zone 21	650	1	Tunnel	70	35	Indéfini
269, boul. René-Lévesque O.	25	Zone 22	250	S.S.	Tunnel	70	25*	Indéfini
506, boul. René-Lévesque E.	16	Zone 23	275	S.S.	Tunnel	70	30**	Indéfini
525, boul. René-Lévesque E.	24							

Adresse	Distance à la voie	Zones	Long.	Type bâti	Profil sol	Vitesse (km/h)	Valeur cible (dB(A))	Niveau Bruit solidien dB(A)
1 100, boulevard René-Lévesque E	20			2	Tunnel	70	35	
775, avenue Honoré-Mercier	0	Zone 24	1375	2	Tunnel	50	35	Indéfini
751, côté d'Abraham	6			3	Tunnel	50	35	
490, rue de la Couronne	8			Zone 25	200	S.S.	Tunnel	
289 QC-175	8	Zone 26	230	1	Sol 8	50	35	33.5
187, autoroute Laurentienne	15	Zone 27	470	2	Sol 8	50	40	31.5
325, rue de la Croix-Rouge	9	Zone 28	275	1	Sol 8	50	40	37.5
675, 1 ^{ère} Avenue	8	Zone 29	575	1	Sol 4	30	35	33.0
1 042, 1 ^{ère} Avenue	7	Zone 30	450	1	Sol 4	30	35	34.0
CHU Saint-François d'Assise	10	Zone 31	230	S.S.	Sol 4	30	VC-D*	Indéfini
1 042, 1 ^{ère} Avenue	7	Zone 32	580	1	Sol 4	30	35	34.0
2 324, 1 ^{ère} Avenue	17	Zone 33	320	1	Sol 7	30	35	30.5
3 020, 1 ^{ère} Avenue	13	Zone 34	700	1	Sol 7	50	35	35.0
4 225, 1 ^{ère} Avenue	22	Zone 35	600	1	Sol 6	50	35	34.0
5 560, 1 ^{ère} Avenue	14	Zone 36	1350	1	Sol 5	50	35	35.0
6 576, avenue Isaac-Bédard	13	Zone 37	950	1	Sol 5	50	35	33.5
7 860, boul. Henri-Bourassa	17			1	Sol 3	50	35	32.5

Une synthèse des poses de voies anti-vibratiles permettant d'éviter tout risque d'impact vibratoire est illustrée sur la figure ci-dessous.

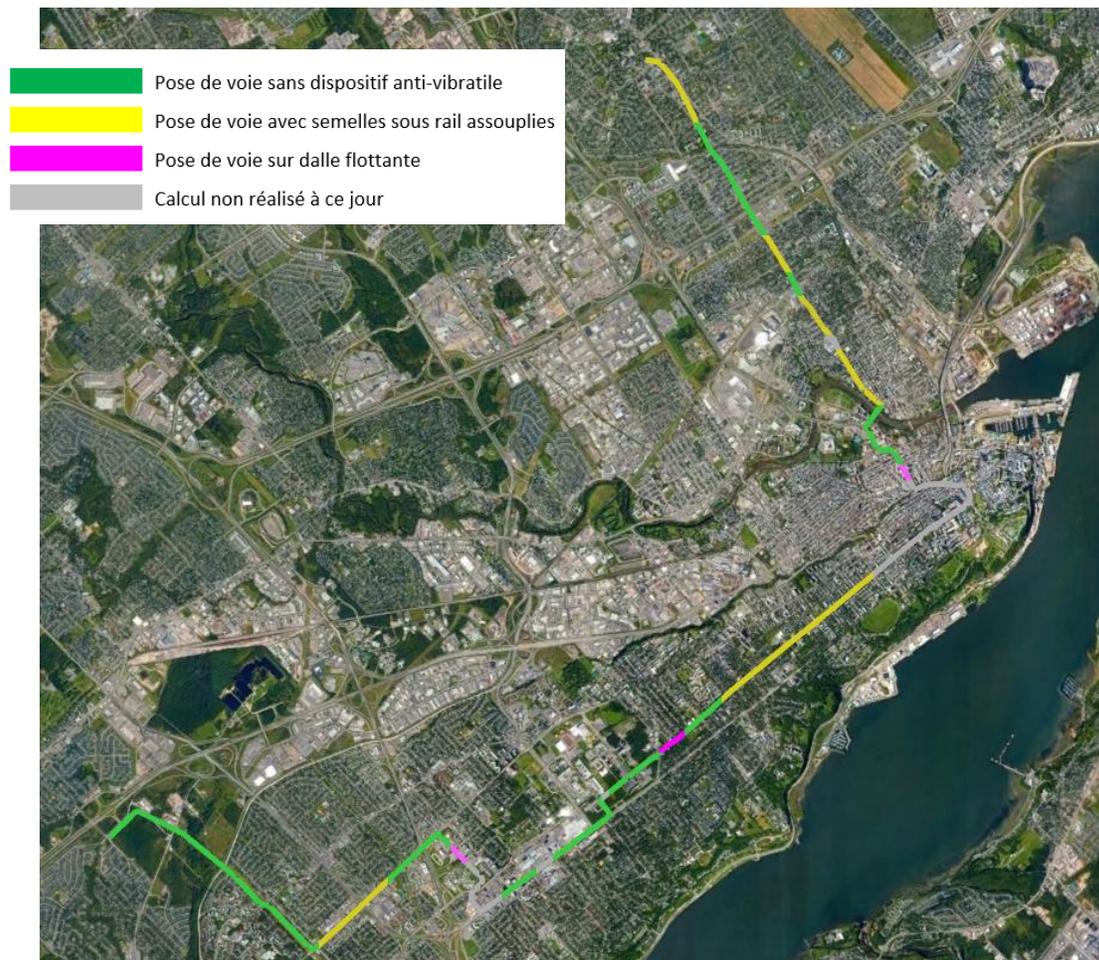


Figure 32 : Linéaire de pose de voie anti vibratile nécessaire à l'évitement de risque d'impact vibratoire (voie en surface)



8.3 CONCLUSION SUR LES IMPACTS RÉSIDUELS APRÈS TRAITEMENT

Les simulations montrent qu'avec le recours aux mesures de mitigation usuelles, à savoir une des poses de voie anti-vibratiles présentées plus haut, l'impact résiduel devient faible pour tous les sites étudiés. En effet, les niveaux de vibration et de bruit solidien sont en dessous des limites fixées.

La solution de mitigation la plus utilisée est le système de pose de voie avec une semelle (ou couche) élastique souple sous le rail. Ce système fréquemment utilisé et relativement peu onéreux est envisagé sur environ 36 % de la longueur totale de la ligne étudiée (18,7 km).

La solution de pose sur dalle flottante, plus performante que la pose précédente, mais aussi plus contraignante en termes de construction et de maintenance, est envisagée au stade actuel des études, sur une section de 910 m.

Les mesures anti-vibratiles considérées sont relativement simples à mettre en œuvre et ne devraient pas représenter un surcoût significatif pour le projet.

Ces résultats seront complétés en phase d'ingénierie détaillée avec l'analyse des secteurs proches des zones de la ligne en tunnel et des sites très sensibles aux vibrations et aux bruits solidiens.

9. DÉMARCHE DE CONTRÔLE DES RISQUES D'IMPACT VIBRATOIRE

L'analyse quantitative a permis de prédire les niveaux de vibration et de bruit solidien pour un grand nombre de sites de sensibilité courante le long des sections de la ligne en surface et donc d'en déduire les types génériques de poses de voie ferrée à envisager sur ces secteurs.

Il convient d'étendre l'étude quantitative sur les sites très sensibles ainsi que les sites de sensibilité situés au voisinage des sections de ligne en tunnel. Les démarches à mettre en œuvre pour ces sites sont résumées ci-dessous.

9.1 DÉMARCHES POUR LES SECTEURS EN SOUTERRAIN

Pour les sites de sensibilité courante dans le secteur « tunnel », l'approche méthodologique à mettre en œuvre pour la simulation des vibrations et bruits transmis par le sol depuis le tunnel en profondeur jusqu'aux bâtiments au-dessus nécessitant un jeu de données d'entrée non accessible au moment de la réalisation de l'étude d'impact, l'étude a consisté à réaliser, à dire d'expert, une analyse de la sensibilité aux vibrations par secteurs, en fonction des paramètres suivants (profondeur du tunnel, distance latérale entre ligne et bâtiment, présence de niveaux souterrains, présence de fondations profondes, sensibilité de l'activité des bâtiments, type de construction des bâtiments). Les conclusions de cette étude permettent de délimiter les zones de vigilance et bâtiments spécifiques qui devront être étudiées durant les études d'ingénierie détaillée à la charge du consortium.

Cette analyse permet en outre d'identifier les zones où il est nécessaire de réaliser des essais vibratoires, mais également des essais de caractérisation des propriétés dynamiques du sol à l'aide de méthodes expérimentales utilisant des sondages géotechniques (méthode *Cross Hole*).

Le consortium devra répondre à un ensemble d'exigences spécifiques aux secteurs proches de la ligne en tunnel. Il s'agira comme écrit plus haut d'exigences de performance, mais également d'une méthodologie d'étude qu'il devra mener en phase de conception, de construction et de validation des systèmes de réduction des vibrations (dispositifs de poses de voie anti-vibratiles).

Pour l'étude d'un site de sensibilité courante sur les portions en tunnel, l'utilisation des fonctions de transfert FT2 et FT3 mesurées sur site est toujours possible. Pour le calcul des mobilités de transfert dans le sol (FT1) avec prise en compte de la réponse vibratoire du tunnel, il peut être avantageux de mettre en œuvre une modélisation en 2D½ en utilisant la méthode des Éléments finis et/ou des Éléments de Frontière (FEM/BEM). Un exemple de résultat de calcul est présenté ci-dessous.

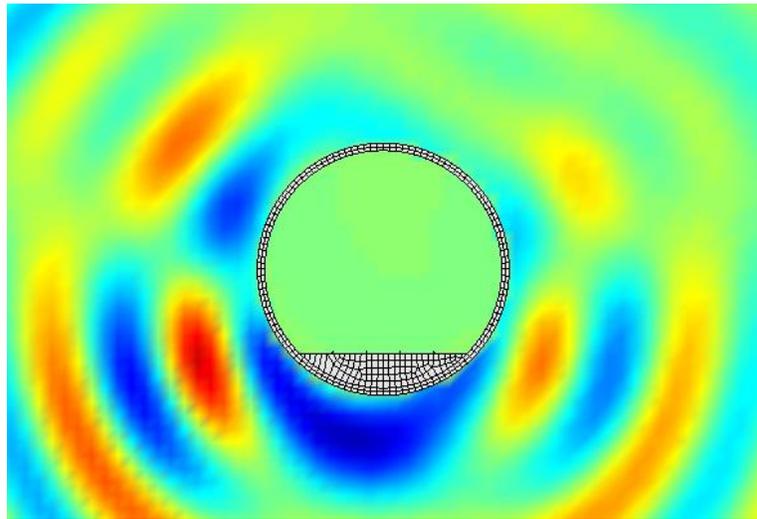


Figure 33 : Exemple de résultat de modélisation 2D½ (FEM-BEM)
avec le logiciel TRAFFIC développé par KU Leuven
(Champ de déplacement dans un sol excité par une force sur le radier du tunnel)

Pour les bâtiments complexes dont les fondations sont proches du tunnel, il peut être nécessaire si les essais sur site sont difficiles à réaliser, de mettre en œuvre un modèle 3D en utilisant la méthode des Éléments finis.

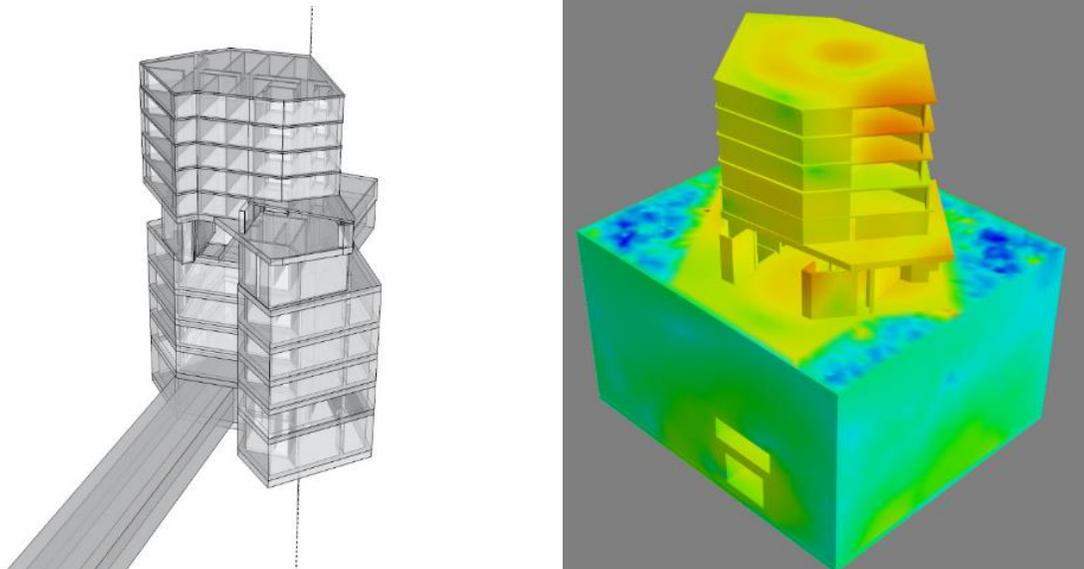


Figure 34 : Étapes d'une modélisation numérique approfondie
(gauche : CAO - Droite : résultats de simulation)

Les modèles numériques utilisés pour le calcul des transferts vibratoires, depuis le tunnel à la surface du sol, requièrent la connaissance des caractéristiques mécaniques du sol jusqu'à la profondeur du tunnel. Deux types d'essais sont réalisés couramment pour déterminer ces caractéristiques. Le principe de ces essais est de déterminer les vitesses de propagation des ondes dans le sol. L'essai le plus précis (essai Cross

Hole), nécessite de réaliser deux ou trois forages pour mesurer les vitesses de propagation à plusieurs hauteurs. Une autre méthode existe qui présente l'avantage d'être non intrusive. Il s'agit de la méthode MASW, qui permet de caractériser le sol sur une hauteur de 20 m environ. La mesure de la masse volumique est souhaitable également : elle est réalisée sur des échantillons non remaniés, obtenus par carottage, et pour un taux d'humidité représentatif.

Le choix de la méthode à utiliser pour la caractérisation des propriétés mécaniques du sol dépend essentiellement de la profondeur du tunnel et de l'espace disponible près du site.

Le transfert vibratoire entre le tunnel et le bâtiment dépend entre autres de la distance entre la structure du tunnel et la fondation du bâtiment. Il est donc important de connaître la profondeur de la partie souterraine des bâtiments ou l'existence de pieux de soutènement, pour tous les bâtiments proches de l'axe du tunnel.

Enfin, il est également possible de caractériser par l'essai, la mobilité de transfert des vibrations dans le sol depuis un point en profondeur (au niveau du futur tunnel) et un point au sol près du bâtiment étudié, comme indiqué dans le guide « FTA ». Toutefois, un tel essai nécessite de réaliser au préalable un forage (souvent dans la voirie) pour pouvoir injecter un effort d'excitation en profondeur, au niveau du futur tunnel.

9.2 DÉMARCHÉ POUR LES SITES SPÉCIFIQUEMENT SENSIBLES

La visite des sites très sensibles recensés à Québec en présence d'un représentant des lieux, a permis d'évaluer le niveau de risque d'impact sur chaque site et de définir les actions d'approfondissement nécessaires (modélisations et essais), à mettre en œuvre en phase d'ingénierie détaillée, pour étudier les risques d'impact et définir les mesures de mitigation les plus appropriées en tenant compte des contraintes du projet.

Pour les sites avec appareils sensibles où un risque d'impact est jugé modéré ou fort, il est recommandé de 1) réaliser des mesures des niveaux vibratoires ambiants au pied des équipements sensibles sélectionnés, durant une période d'activité normale du site afin de définir un seuil vibratoire représentatif des conditions d'utilisation de l'appareil; 2) mesurer les fonctions de transfert vibratoire dans le sol entre la ligne et le bâtiment contenant l'appareil sensible, ainsi que les fonctions de transfert entre le sol et la dalle au pied de l'équipement sensible; et 3) calculer, à partir des grandeurs ci-dessus mesurées lors des essais, les niveaux de vibration au pied des équipements sensibles.

Après l'analyse à dire d'expert de la sensibilité des sites visités, les études approfondies concernent principalement l'Hôpital Saint-François d'Assises et l'INRS, qui sont les sites les plus exposés et comportant les activités les plus sensibles. Toutefois, une modélisation est conseillée également pour le GMFU Laurier, pour statuer sur l'absence de risque de perturbations d'un microscope confocal (appareil le plus sensible identifié), ainsi que sur le site du CHU Laval, où le risque d'impact apparaît, avant simulation, relativement faible.



Pour les lieux où la sensibilité est en termes de bruit (salles de concert, cabine d'audiométrie, etc.), il est recommandé également de mettre en œuvre un modèle détaillé, en s'appuyant sur les essais de caractérisation des fonctions de transfert vibratoires citées ci-dessus, mais également de procéder à la mesure du bruit de fond (plutôt que le niveau vibratoire ambiant sur le plancher), et des caractéristiques acoustiques de la salle (temps de réverbération) afin de pouvoir calculer précisément le niveau de bruit solidien. Cela concerne le Grand Théâtre de Québec (notamment le Studio 29), la grande salle du Palais Montcalm et la salle Le Diamant. Il n'est pas nécessaire de poursuivre l'étude pour la salle Le Capitole dans la mesure où ce site est moins exposé et moins sensible que la salle Le Diamant, plus proche du tracé.

10. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Les études vibratoires réalisées à ce jour, sur les secteurs où la ligne est en surface (représentant au total environ 80 % du tracé de la future ligne de tramway de Québec), ont permis de montrer que le niveau de risque d'impact lié aux vibrations du tramway était faible à modéré à Québec, en raison notamment de contraintes d'insertion urbaine modérées (voiries assez larges dans l'ensemble).

Les simulations indiquent que les niveaux de vibration et de bruit solidien en considérant une pose de voie classique (sans atténuation vibratoire) sont inférieurs aux valeurs limites fixées, sur un linéaire de 15 km, soit 80 % de la longueur totale de voie étudiée.

La mise en place de systèmes de pose de voie anti-vibratile permet de respecter les critères sur les sites où ces derniers sont dépassés dans le cas d'une pose de voie ferrée classique. La solution de mitigation la plus utilisée est le système de pose de voie avec une semelle (ou couche) élastique souple sous le rail. Ce système fréquemment utilisé et relativement peu onéreux est envisagé sur environ 16 % de la longueur totale de la ligne étudiée. La solution de pose sur dalle flottante, plus performante que la pose précédente, mais aussi plus contraignante en termes de construction et de maintenance, est nécessaire, au stade actuel des études, sur une section de 230 m seulement.

Les mesures anti-vibratiles considérées sont relativement simples à mettre en œuvre et ne devraient pas représenter un surcoût significatif pour le projet.

Il conviendra en phase d'ingénierie détaillée de faire les études d'impact vibratoire sur les sites très sensibles ayant fait l'objet d'une analyse de sensibilité dans la présente étude, et sur les sites sensibles à proximité des sections de ligne en souterrain (non caractérisés dans cette étude, en raison d'une insuffisance des données nécessaires).

Dans la suite du projet, il est nécessaire de rédiger un ensemble de spécifications techniques relatives au sujet des vibrations, à la lumière des conclusions de cette étude d'impact. Le consortium devra répondre à ces exigences exprimées en termes de performance (seuils limites de niveaux vibratoires et de bruit solidien à ne pas dépasser à l'intérieur des bâtiments), mais également en termes de moyens d'étude (modélisations et essais), de conception, de construction et de validation des systèmes de réduction des vibrations (dispositifs de poses de voie anti-vibratiles).

Le dispositif global mis en place par le consortium fera l'objet de la rédaction d'un Plan de Management décrivant les différentes activités relatives à la maîtrise des vibrations et bruits solidiens transmis par le sol en phase d'exploitation du futur tramway. Le dispositif s'intéressera également aux autres phases :

- Construction avec la mise en place d'un protocole d'essais de validation des performances vibratoires des mesures de mitigation;
- Réception du système de transport (avec la mise en place d'un protocole d'essais en ligne de contrôle du respect des seuils et des performances des mesures de mitigation en conditions réelles);
- Exploitation/entretien (avec la mise en place d'un dispositif de maintien des niveaux d'excitation vibratoire par des campagnes périodiques de meulage des rails).

11. RÉFÉRENCES

- [1] Transit Noise and Vibration Impact Assessment Manual. FTA Report No. 0123 (2018).
- [2] ISO 14837-1 :2006. Mechanical vibration -- Ground-borne noise and vibration arising from rail systems -- Part 1: General guidance.
- [3] ISO 2631-1:1997 « Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 1: General requirements ».
- [4] ISO 2631-2:2003 « Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 2: Continuous and shock-induced vibration in buildings (1 to 80 Hz) ».
- [5] ISO/TS 14837-31:2017. Mechanical vibration – Ground-borne noise and vibration arising from the rail system – Part 31: Measurement for the evaluation of complaints at residential buildings.
- [6] Les Collections de l'INRETS. Bruit et vibrations dus aux tramways : Émission et perception. Rapport INRETS n° 279. Décembre 2009.
- [7] Marc Maldonado. Vibrations dues au passage d'un tramway : mesures expérimentales et simulations numériques. Sciences de l'ingénieur. École Centrale de Nantes (ECN), 2008.
- [8] RIVAS (Railway Induced Vibration Abatement Solutions), collaborative project, deliverable D1.6, Definition of appropriate procedures to predict exposure in buildings and estimate annoyance (2012).
- [9] K. Alten, H. Friedl, R. Flesch, Calculating Ground-Borne Noise From Ground-Borne Vibration– A Comparison of Different Approaches; Proceeding of ISMA 2010.
- [10] M. Villot, E. Augis et al., Vibration Emission from Railway Lines in Tunnel Characterization and Prediction, International Journal of Rail Transportation, 2016.

ANNEXE – Résultats version 1

Le code couleur utilisé dans la colonne de droite du tableau de résultats présenté ci-dessous pour indiquer le niveau de risque d'impact est le suivant :

	Risque d'impact nul ou très faible
	Risque d'impact modéré
	Risque d'impact fort
	Non calculé à ce jour

Tableau 7 : Synthèse des niveaux des niveaux de bruits solidiens estimés sans moyen de mitigation sur le tracé du tramway de la ville de Québec.

Adresse	Distance à la voie	Zones	Long.	Type bâti	Profil sol	Vitesse	Val. Cible	Niveau Bruit solidien dB(A)
						(km/h)	(dB(A))	
447, rue Mendel	30	Zone 1	1760	3	Sol 1	70	40	Indéfini
700, rue Gingras	26	Zone 2	1615	1	Sol 1	70	35	27,0
916, boul. Pie-XII	23	Zone 3	203	1	Sol 1	50	35	26,5
3 427, chemin des Quatre-Bourgeois	13	Zone 4	1120	1	Sol 2	50	35	30,5
990, avenue de Bourgogne	15			2	Sol 2	50	35	23,5
3 083, chemin des Quatre-Bourgeois	13	Zone 5	550	2	Sol 2	50	40	24,0
3 001, chemin des Quatre-Bourgeois	13	Zone 6	360	1	Sol 2	50	40	30,5
1 020, avenue Roland-Beaudin	8	Zone 7	490	1	Sol 14	50	40	43,5
3 000, boul. Hochelaga	33	Zone 8	466	2	Tunnel	50	40	Indéfini
1 175, avenue Lavigerie	18	Zone 9	604	2	Tunnel	50	40	Indéfini
2 875, boul. Laurier	50	Zone 10	580	2	Sol 13	50	VC-A	6,5
2 705, boul. Laurier	50	Zone 11	275	S.S.	Sol 13	30	VC-D*	Indéfini
2 875, boul. Laurier	50	Zone 12	725	2	Sol 13	50	40	6,5
2 431, boul. Laurier	45	Zone 13	190	1	Sol 13	50	35	9,0
1 100, avenue de la Médecine	25	Zone 14	510	2	Sol 15	40	35	26,5
2 325, rue de l'Université	20	Zone 15	100	S.S.	Sol 15	30	VC-G*	Indéfini
2 255, rue de l'Université	28	Zone 16	850	2	Sol 15	40	35	25,0
2 095, boul. René-Lévesque O.	12	Zone 17	380	1	Sol 12	70	35	36,0
2 023, boul. René-Lévesque O.	13	Zone 18	600	1	Sol 12	30	35	32,0
1 455, boul. René-Lévesque O.	12	Zone 19	1000	1	Sol 11	50	35	34,5
1 235, boul. René-Lévesque O.	11			1	Sol 11	50	35	35,0
549, boul. René-Lévesque O.	12	Zone 20	1450	1	Sol 10	50	35	34,0
148, boul. René-Lévesque O.	10	Zone 21	650	1	Tunnel	70	35	Indéfini
269, boul. René-Lévesque O.	25	Zone 22	250	S.S.	Tunnel	70	25*	Indéfini
506, boul. René-Lévesque E.	16	Zone 23	275	S.S.	Tunnel	70	30**	Indéfini
525, boul. René-Lévesque E.	24							Indéfini
1 100, boul. René-Lévesque E.	20	Zone 24	1375	2	Tunnel	70	35	Indéfini
775, avenue Honoré-Mercier	0			2	Tunnel	50	35	Indéfini

Adresse	Distance à la voie	Zones	Long.	Type bâti	Profil sol	Vitesse	Val. Cible	Niveau Bruit solidien dB(A)
						(km/h)	(dB(A))	
751 Côte d'Abraham	6			3	Tunnel	50	35	Indéfini
490, rue de la Couronne	8	Zone 25	200	S.S.	Tunnel	50	VC-F*	Indéfini
289, QC-175	8	Zone 26	230	1	Sol 8	50	35	35,5
187, autoroute Laurentienne	15	Zone 27	470	2	Sol 8	50	40	31,0
325, rue de la Croix-Rouge	9	Zone 28	275	1	Sol 8	50	40	34,5
675, 1 ^{ère} Avenue	8	Zone 29	575	1	Sol 4	30	35	34,5
1 042, 1 ^{ère} Avenue	7	Zone 30	450	1	Sol 4	30	35	35,5
CHU Saint-François d'Assise	10	Zone 31	230	S.S.	Sol 4	30	VC-D*	Indéfini
1 042, 1 ^{ère} Avenue	7	Zone 32	580	1	Sol 4	30	35	35,5
2 324, 1 ^{ère} Avenue	17	Zone 33	320	1	Sol 7	30	35	32,0
3 020, 1 ^{ère} Avenue	13	Zone 34	700	1	Sol 7	50	35	35,5
4 225, 1 ^{ère} Avenue	22	Zone 35	600	1	Sol 6	50	35	33,5
5 560, 1 ^{ère} Avenue	14	Zone 36	1350	1	Sol 5	50	35	31,0
6 576, avenue Isaac-Bédard	13	Zone 37	950	1	Sol 5	50	35	31,5
7 860, boul. Henri-Bourassa	17			1	Sol 3	50	35	31,0

* Les niveaux de sensibilité des sites spécifiquement sensibles sont détaillés au chapitre 8.

** Site n'ayant pas fait l'objet d'une visite

Une synthèse des résultats obtenus après mise en place des mesures de mitigation est présentée dans le tableau ci-après.

Un code couleur est utilisé dans la colonne de droite du tableau pour indiquer le type de pose de voie retenu. Ce code est le suivant :

	Pose de voie sans dispositif anti-vibratile
	Pose de voie avec semelles sous rail assouplies
	Pose de voie sur dalle flottante
	Calcul non réalisé à ce jour

Tableau 8 : Synthèse du risque d'impact résiduel et pose de voie anti-vibratile préconisée

Adresse	Distance à la voie	Zones	Long.	Type bâti	Profil sol	Vitesse (km/h)	Valeur cible (dB(A))	Niveau Bruit solidien dB(A)
447, rue Mendel	30	Zone 1	1760	3	Sol 1	70	40	Indéfini
700, rue Gingras	26	Zone 2	1615	1	Sol 1	70	35	27,0
916, boul. Pie-XII	23	Zone 3	203	1	Sol 1	50	35	26,5
3 427, chemin des Quatre-Bourgeois	13	Zone 4	1120	1	Sol 2	50	35	30,5
990, avenue de Bourgogne	15			2	Sol 2	50	35	23,5
3 083, chemin des Quatre-Bourgeois	13	Zone 5	550	2	Sol 2	50	40	24,0
3 001, chemin des Quatre-Bourgeois	13	Zone 6	360	1	Sol 2	50	40	30,5
1 020, avenue Roland-Beaudin	8	Zone 7	490	1	Sol 14	50	40	38,0

Adresse	Distance à la voie	Zones	Long.	Type bâti	Profil sol	Vitesse (km/h)	Valeur cible (dB(A))	Niveau Bruit solidien dB(A)
3 000, boulevard Hochelaga	33	Zone 8	466	2	Tunnel	50	40	Indéfini
1 175, avenue Lavigerie	18	Zone 9	604	2	Tunnel	50	40	Indéfini
2 875, boul. Laurier	50	Zone 10	580	2	Sol 13	50	VC-A	6,5
2 705, boul. Laurier	50	Zone 11	275	S.S.	Sol 13	30	VC-D*	Indéfini
2 875, boul. Laurier	50	Zone 12	725	2	Sol 13	50	40	6,5
2 431, boul. Laurier	45	Zone 13	190	1	Sol 13	50	35	9,0
1 100, avenue de la Médecine	25	Zone 14	510	2	Sol 15	40	35	26,5
2 325, rue de l'Université	20	Zone 15	100	S.S.	Sol 15	30	VC-G*	Indéfini
2 255, rue de l'Université	28	Zone 16	850	2	Sol 15	40	35	25,0
2 095, boul. René-Lévesque O.	12	Zone 17	380	1	Sol 12	70	35	31,5
2 023, boul. René-Lévesque O.	13	Zone 18	600	1	Sol 12	30	35	32,0
1 455, boul. René-Lévesque O.	12	Zone 19	1000	1	Sol 11	50	35	24,5
1 235, boul. René-Lévesque O.	11			1	Sol 11	50	35	34,0
549, boul. René-Lévesque O.	12	Zone 20	1450	1	Sol 10	50	35	34,0
148, boul. René-Lévesque O.	10	Zone 21	650	1	Tunnel	70	35	Indéfini
269, boul. René-Lévesque O.	25	Zone 22	250	S.S.	Tunnel	70	25*	Indéfini
506, boul. René-Lévesque E.	16	Zone 23	275	S.S.	Tunnel	70	30**	Indéfini
525, boul. René-Lévesque E.	24							
1 100, boule. René-Lévesque E.	20			2	Tunnel	70	35	
775, avenue Honoré-Mercier	0	Zone 24	1375	2	Tunnel	50	35	Indéfini
751, côté d'Abraham	6			3	Tunnel	50	35	
490, rue de la Couronne	8			Zone 25	200	S.S.	Tunnel	
289 QC-175	8	Zone 26	230	1	Sol 8	50	35	32,5
187, autoroute Laurentienne	15	Zone 27	470	2	Sol 8	50	40	31,0
325, rue de la Croix-Rouge	9	Zone 28	275	1	Sol 8	50	40	34,5
675, 1 ^{ère} Avenue	8	Zone 29	575	1	Sol 4	30	35	34,5
1 042, 1 ^{ère} Avenue	7	Zone 30	450	1	Sol 4	30	35	32,5
CHU Saint-François d'Assise	10	Zone 31	230	S.S.	Sol 4	30	VC-D*	Indéfini
1 042, 1 ^{ère} Avenue	7	Zone 32	580	1	Sol 4	30	35	32,5
2 324, 1 ^{ère} Avenue	17	Zone 33	320	1	Sol 7	30	35	32,0
3 020, 1 ^{ère} Avenue	13	Zone 34	700	1	Sol 7	50	35	34,5
4 225, 1 ^{ère} Avenue	22	Zone 35	600	1	Sol 6	50	35	33,5
5 560, 1 ^{ère} Avenue	14	Zone 36	1350	1	Sol 5	50	35	31,0
6 576, avenue Isaac-Bédard	13	Zone 37	950	1	Sol 5	50	35	31,5
7 860, boul. Henri-Bourassa	17			1	Sol 3	50	35	31,0



LA CONFIANCE TRANSPORTE LE MONDE

SYSTRA
CANADA 