LUXTRAM
TRAM RAPIDE ESCH
TRONÇON RAPIDE 1,
TRACÉ OPTIMISÉ

Étude des incidences vibratoires

Client	LSC360
Commande	4500006189 du 14-11-2025
Référence	N5874/R07
Date	29-06-2026
Rédigé par	Wouter Beeterens
Vérifié par	Bert Stallaert
Approuvé par	Tom Vanhonacker

D2S International
T. +32 (0)16 23 89 88 Ambachtenlaan 54
B – 3001 Heverlee
d2sint@d2sint.com LU26475064
www.d2sint.com

CONTRÔLE DE RÉVISION

Issu	Date	Description
Original	29-06-2026	1re diffusion

DISTRIBUTION

n°	Entreprise	Nom
1	LSC360	Josephine Klein

TABLE DES MATIÈRES

0 Introduction 1

1 Description des zones étudiées 3

1.1 Plan d'aménagement Général 3

1.2 Géologie 4

2 Cadre légal et règlementation 6

2.1 Vibrations – DIN 4150-2 6

2.1.1 Paramètres d'évaluation 6

2.1.2 Procédure d'évaluation 7

2.2 Vibrations – DIN 4150-3 9

2.3 Bruit solidien – VDI 2719 10

3 État des lieux vibratoire initial 12

4 Méthodologie du calcul 24

4.1 La source vibratoire ; le spectre de densité de force 25

4.2 La transmission vibratoire 27

4.2.1 L'interaction sol-structure entre les fondations du viaduc et le sol 27

4.2.2 La transmission du sol 28

4.3 Le récepteur 33

4.4 Prédictions et préconisations de mesures à prendre 35

4.4.1 Variante « Tracé antérieur » relative à l'étude N5874/R04C 35

4.4.2 Variante « Tracé optimisé » 36

4.4.3 Mesures antivibratoires (le cas échéant) 38

5 Résultats des calculs 40

5.1 Variante « Tracé antérieur » relative à l'étude N5874/R04C 41

5.2 Variante « Tracé optimisé » 45

5.3 Mesures de mitigation 48

5.3.1 Variante « Tracé antérieur » relative à l'étude N5874/R04C 48

5.3.2 Variante « Tracé optimisé » 51

5.4 Effets cumulatifs variante « Tracé optimisé » – corridor multimodal 52

6 Phase chantier 54

6.1 Méthodologie 54

6.2 Critères 55
6.3 Sources 56
6.4 Phasage 57
6.5 Récepteurs 57
6.6 Bilan des différents impacts 57
6.6.1 Réalisation des voies 58
6.6.2 La construction des ouvrages d'art 61
6.6.3 La construction des sous-stations de traction 73
7 Conclusion 74
Annexe A – État initial, détails des mesures
Annexe B – Résultats de calcul « Tracé antérieur » – zone 4 (zone résidentielle)
Annexe C – Résultats de calcul « Tracé antérieur » – zone 3 (zone mixte)
Annexe D – Résultats de calcul « Tracé optimisé » – zone 4 (zone résidentielle)
Annexe E – Résultats de calcul « Tracé optimisé » – zone 3 (zone mixte)
Annexe F – Taux d'affaiblissement vibratoire

0 INTRODUCTION

Ce rapport présente les résultats de l'étude des incidences vibratoires sur l'environnement humain dans le cadre du projet du tram rapide Esch. Le tronçon étudié est le tronçon rapide 1 (Tracé optimisé), d'une longueur totale d'environ 10 km, entre le sud-ouest de la Ville de Luxembourg, Cloche d'Or et Foetz.

Le tronçon rapide 1 se rattachera à la fin du tronçon D2 pour aboutir au futur CRM Sud Cloche d'Or (tronçon de raccordement). Le tronçon se poursuit ensuite vers le sud le long de la route nationale N4. À Leudelange, le tronçon traverse au-dessus de l'autoroute A4 vers la zone d'activités économiques « Poudrerie » et continue sur un viaduc. Après la station de Leudelange, laquelle se trouve sur l'ouvrage d'environ 800 m, le tronçon retourne par-dessus vers le sud de l'autoroute pour poursuivre son trajet vers Pontpierre. À la hauteur de la station-service de Pontpierre, le tronçon descend et passe sous l'autoroute A4 avant de remonter vers l'échangeur de Pontpierre, où se trouve à nouveau la station située sur le viaduc (ouvrage d'environ 842 m). Le tronçon retourne par-dessus vers le sud de l'autoroute pour poursuivre son trajet le long de la piste cyclable existante « Foetzerkopp ». Après le passage entre l'autoroute A4 et la zone industrielle de Foetz, le tronçon traverse le CR164 « rue du Brill », au-dessus duquel se trouve la station de Foetz.

3 stations seront desservies sur le tronçon étudié :

- Station Leudelange : au niveau de la zone d'activités économiques « Poudrerie » à Leudelange,
- Station Pontpierre : au niveau du nouvel échangeur de Pontpierre,
- Station Foetz : au-dessus du croisement avec la rue du Brill (CR164).

L'étude a comme objectif le calcul prédictif vibratoire pour permettre, sur la base du tracé des voies, des fréquences de passage des trams et des types de trams utilisés, d'établir les zones du tracé qui vont requérir une technique de pose de voie antivibratoire afin de répondre à l'exigence de la norme de confort vibratoire chez les riverains.

Deux variantes ont été étudiées :

- Variante « Tracé antérieur » relative à l'étude N5874/R04C du 17-09-2025
- Variante « Tracé optimisé »

La méthodologie de calcul est décrite en détail dans les chapitres suivants. Les calculs sont basés sur des mesures in situ et des données reçues. Le choix de la localisation des points de mesure est également basé sur ces données.

Le rapport est structuré comme suit : le chapitre 1 décrit les zones étudiées ; le chapitre 2 décrit le cadre normatif ; le chapitre 3 présente les résultats des mesures de l'état initial ; le chapitre 4 décrit la méthodologie du calcul. Le chapitre 5 présente les résultats du calcul et les conclusions sur la base des bâtiments existants, ainsi que les résultats de l'évaluation

par rapport au PAG. Le chapitre 6 présente l'évaluation des incidences lors de la phase chantier. Finalement, le chapitre 7 donne la conclusion.

1 DESCRIPTION DES ZONES ÉTUDIÉES

1.1 PLAN D'AMÉNAGEMENT GÉNÉRAL

La figure 1.1 montre le plan d'aménagement général « PAG » de la zone concernée. Le tronçon étudié « Tracé optimisé » (dernière variante) est montré en rouge.

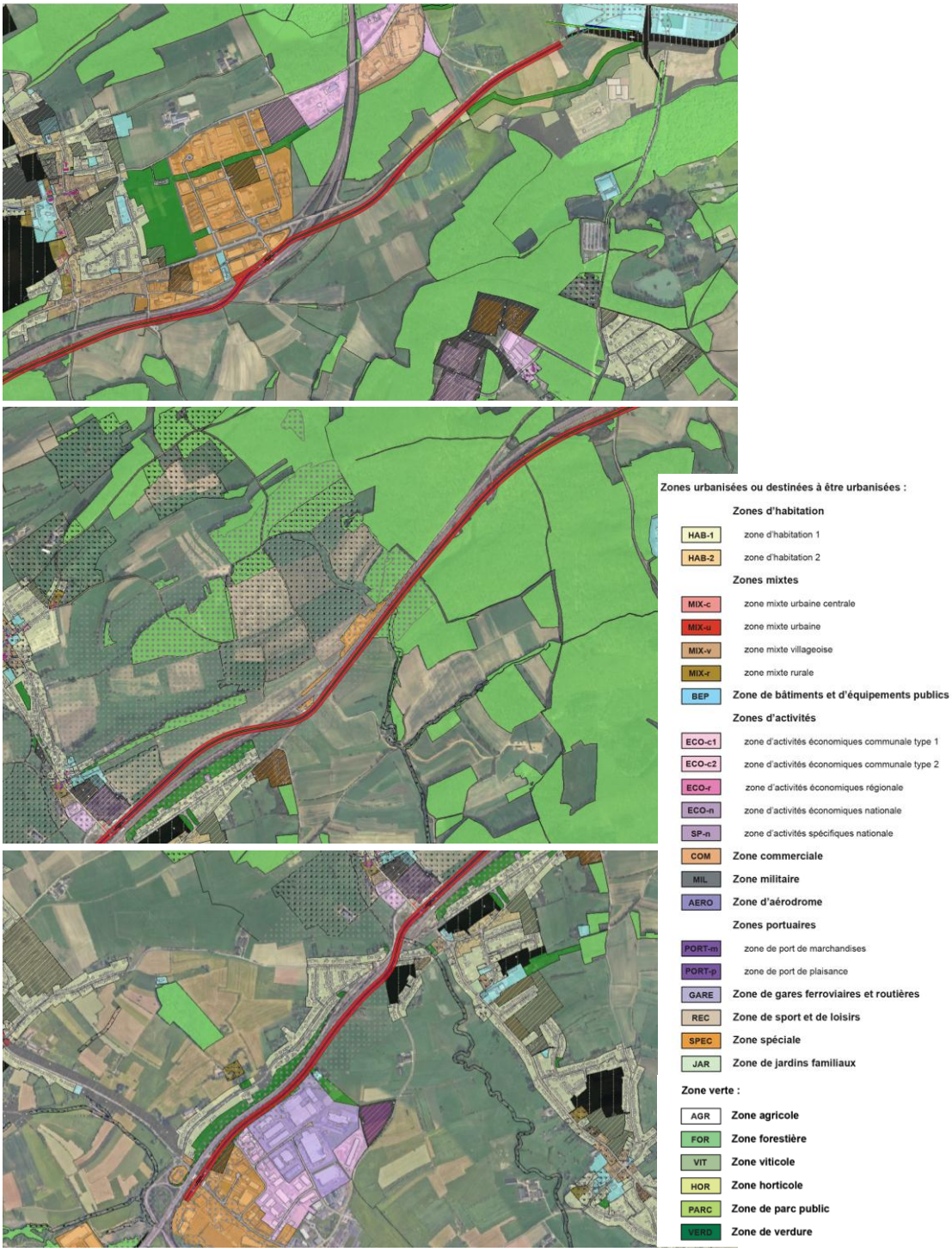


Figure 1.1 Plan d'aménagement général de la zone concernée, « Tracé optimisé »

Le long du tracé, il y a plusieurs zones définies par le PAG :

- Leudelange
  - une zone de bâtiments et d'équipements publics [BEP] en bleu clair,
  - une zone de sport et de loisirs [REC] en beige,
  - des zones forestières en vert [FOR],
  - des zones spéciales 1 [SPEC-1] en orange (zone d'activités Poudrerie),
  - une zone de bâtiments et d'équipements publics 1 - constructible [BEP-1],
  - une zone mixte villageoise [MIX-v] en beige (le long de la route nationale N4),
  - une zone d'habitation 1 [HAB-1] en jaune (le long de la route nationale N4).
- Pontpierre
  - une zone spéciale [SPEC-S] en orange,
  - des zones d'habitation 1 [HAB-1] en jaune (rue d'Europe),
  - une zone spéciale [SPEC-Am Hau] en orange (rue d'Europe),
  - des zones de verdure [VERD], en vert foncé
  - des zones d'activités économiques communale type 1 [ECO-c1] en mauve,
  - une zone de bâtiments et d'équipements publics [BEP] en bleu clair,
  - des zones d'habitation 1 [HAB-1] en jaune (au sud du nouvel échangeur de Pontpierre, rue d'Esch et rue de Schifflange).
- Foetz
  - des zones d'habitation 1 [HAB-1] en jaune (au sud-ouest du nouvel échangeur de Pontpierre, rue Belle-Vue et rue Théodore de Wacquant),
  - des zones de verdure [VERD], en vert foncé,
  - une zone de bâtiments et d'équipements publics [BEP] en bleu clair,
  - une zone d'activités économiques nationale [ECO-n] en violet,
  - une zone d'activités économiques communale type 1 [ECO-c1] en mauve,
  - des zones spéciales [SPEC-F] en orange.

1.2 GÉOLOGIE

La géologie est illustrée à la figure 1.2 ; la ligne de tramway débute au droit du nouveau stade de la Cloche d'Or, sur des marnes feuilletées, argileuses et grises (lm2), recouvrant un calcaire ocreux. Au nord-est de Pontpierre, une nouvelle couche géologique apparaît (lm3), recouvrant la précédente. Elle n'est que légèrement différente, puisqu'il s'agit toujours de marnes argileuses, mais ne présentant plus de disposition en feuillets. Cette formation encadre les alluvions s'étirant le long du cours d'eau de la Mess avant qu'elle disparaisse sous un horizon d'argilites marneuses (lo1), finement feuilletées et grises, au droit de la commune de Foetz. Les trois points de mesure, pour la mesure de transmission vibratoire, correspondent chacun à une couche géologique différente.

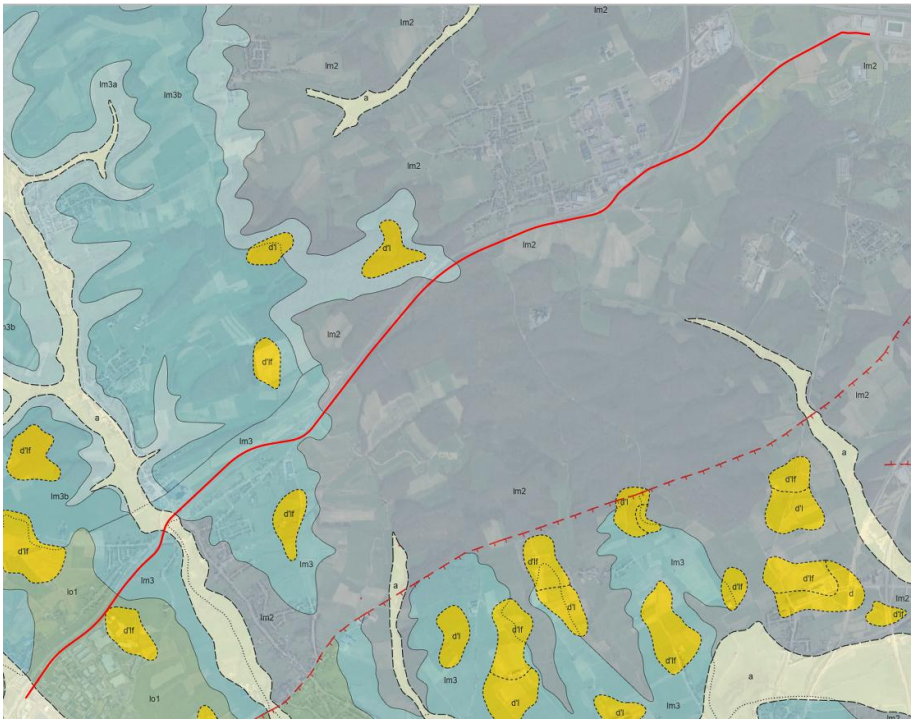


Figure 1.2 Carte géologique, « Tracé optimisé »
Marnes feuilletées (gris)
Couches à Pleuroceras spinatum (bleu clair et jaune clair)
Couches à Harpoceras falciferum (vert)

2 CADRE LÉGAL ET RÈGLEMENTATION

Au Luxembourg, il n'existe actuellement aucun texte règlementaire concernant les vibrations ou le bruit solidien. À défaut d'une règlementation nationale, les études d'incidences réalisées au Luxembourg s'orientent sur la règlementation allemande ;

- la norme DIN 4150-2 concernant les effets des vibrations sur les personnes dans les bâtiments ;
- la norme DIN 4150-3 concernant les effets des vibrations sur des structures ;
- la norme VDI 2719 concernant le bruit solidien.

À part cette règlementation spécifique aux vibrations et au bruit solidien, les règlements à observer lors de l'étude est le suivant ;

- la loi modifiée du 15 mai 2018 relative à l'évaluation des incidences sur l'environnement ;
- les règles d'urbanisme applicables (PAG de la Ville de Luxembourg).

2.1 VIBRATIONS – DIN 4150-2

2.1.1 Paramètres d'évaluation

Le paramètre mesuré est KB_F, la vitesse vibratoire, pondérée selon la norme DIN 45669-1 (constante de temps τ=0.125 s (fast)), sur une bande de fréquence limitée entre 1 et 80 Hz et avec un filtre passe-haut (fréquence de coupure : 5.6 Hz).

L'évaluation de la norme est ensuite basée sur les valeurs KB_{FTi}, les valeurs maximales de KB_F pendant chaque période de 30 s, comme illustré à la figure 2.1.

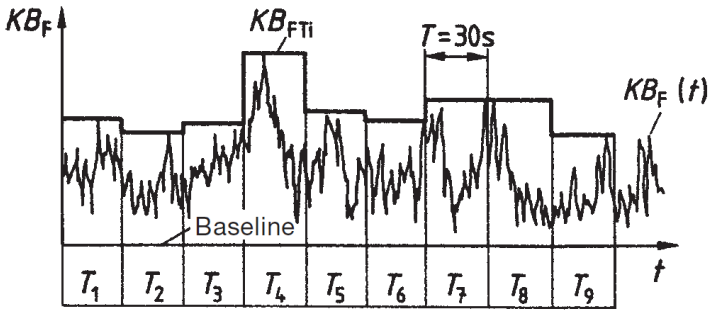


Figure 2.1 Détermination de KBFTi

Les 2 paramètres utilisés dans l'évaluation sont les valeurs KB_{Fmax} et KB_{FTr} :

- KB_{Fmax} : la valeur maximale de KB_{FTi} ;
- KB_{FTr} : « l'intensité vibratoire », une moyenne des valeurs KB_{FTi} uniquement pendant les événements vibratoires, dans ce cas pendant les passages des trams.

Le paramètre KB_{FTr} est déterminé comme suit :

$$KB_{FTr} = \sqrt{\frac{1}{T_r}\sum_j T_{e,j} KB^2_{FTm,j}}$$

avec T_r la période d'évaluation (pendant la journée : 16 heures, pendant la nuit : 8 heures) ;

$T_{e,j}$ la durée d'exposition pendant laquelle le niveau vibratoire $KB_{FTm,j}$ est mesuré.

Il importe de noter que dans la détermination de KB_{FTr}, des valeurs de KB_{FTi} inférieures à 0.1 ne sont pas prises en compte, la raison en étant que la valeur 0.1 est considérée comme seuil de perception et que des niveaux vibratoires inférieurs au seuil de perception ne sont pas susceptibles de causer de nuisances.

2.1.2 Procédure d'évaluation

Les paramètres d'évaluation sont déterminés et comparés aux valeurs guides dans le tableau 2.1. Le jour correspond à la période allant de 6h00 à 22h00, la nuit de 22h00 à 6h00. Le tableau 2.2 montre les mêmes valeurs, mais exprimées en [dB] (re.1e-9m/s). Une valeur de 100 dB correspond à KB=0.1, le seuil de perception.

cat.	emplacement du bâtiment	jour			nuit		
		A_u	A_o	A_r	A_u	A_o	A_r
1	zone industrielle	0.4	6	0.2	0.3	0.6	0.15
2	zone commerciale	0.3	6	0.15	0.2	0.6	0.1
3	zone mixte commerciale et résidentielle	0.2	5	0.1	**0.1**	0.6	0.07
4	zone résidentielle	0.15	3	0.07	0.1	0.6	0.05
5	zone protégée (hôpitaux, …)	0.1	3	0.05	0.1	0.6	0.05

Tableau 2.1 Valeurs guide pour l'évaluation de l'exposition aux vibrations des personnes dans les bâtiments

cat.	emplacement du bâtiment	jour			nuit		
		A_u	A_o	A_r	A_u	A_o	A_r
1	zone industrielle	112	135	106	109.5	115.5	103.5
2	zone commerciale	109.5	135	103.5	106	115.5	100
3	zone mixte commerciale et résidentielle	106	134	100	**100**	115.5	97
4	zone résidentielle	103.5	129	97	100	115.5	94
5	zone protégée (hôpitaux, …)	100	129	94	100	115.5	94

Tableau 2.2 Valeurs guide pour l'évaluation de l'exposition aux vibrations des personnes dans les bâtiments – valeurs en [dB (re.1e-9m/s)]

Il y a lieu de noter que les valeurs foncées ont été modifiées dans la dernière version de la norme, d'août 2025. Additionnellement, le tableau tient compte des dispositions spécifiques pour le trafic ferroviaire en surface ; la valeur A_o pendant la période de nuit est de 0.6 pour toutes les zones.

Après la détermination de KB_{Fmax} et KB_{FTr}, la chaîne de prise de décision est telle qu'illustrée à la figure 2.2. L'évaluation est basée sur la direction dans laquelle le niveau vibratoire maximal est observé.

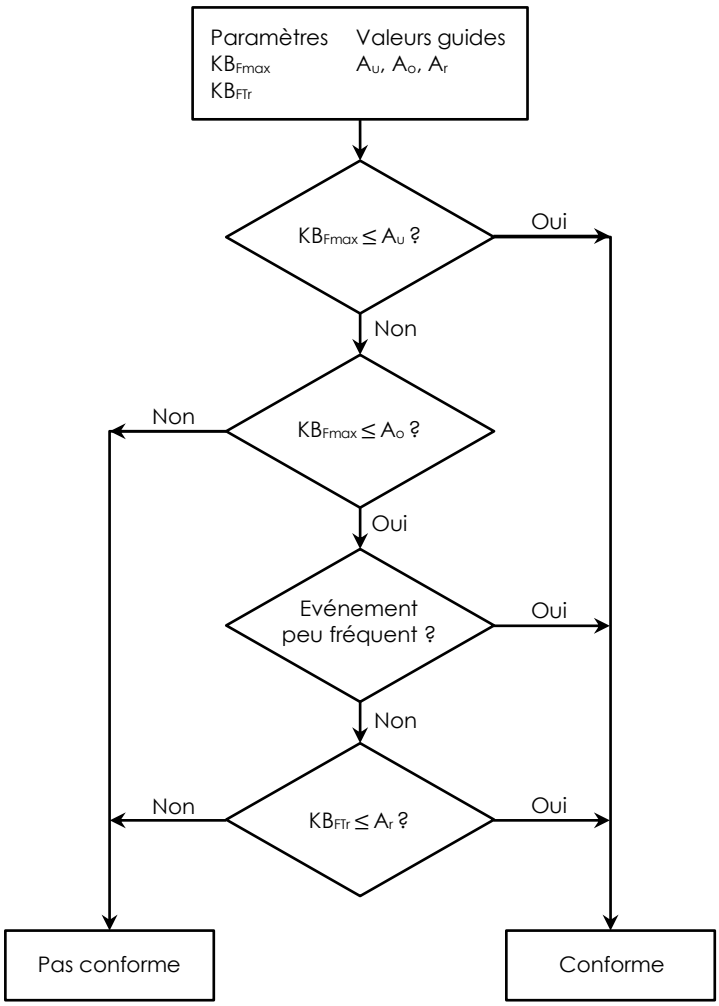


Figure 2.2 Procédure d'évaluation

En résumant, si le niveau vibratoire ne dépasse pas le seuil A_u, la conformité de la norme est toujours garantie. Si le niveau vibratoire dépasse le seuil A_o, la norme n'est pas respectée. La période la plus restrictive est celle de nuit.

Il est proposé de dimensionner pour toujours respecter la limite A_u, de sorte que la conformité soit garantie n'importe le nombre de passages par jour. Cette approche évite que les conclusions modifient après une adaptation des fréquences de passage des trams.

2.2 VIBRATIONS – DIN 4150-3

La norme DIN 4150-3 concerne l'effet des vibrations sur les bâtiments. Elle donne des valeurs limites pour les vibrations qui, quand elles ne sont pas dépassées, assurent que les vibrations ne causeront pas de dommage aux bâtiments et/ou aux structures.

Le paramètre d'évaluation pour les vibrations est l'amplitude de vitesse vibratoire, mesurée sur un point dur du bâtiment, exprimée en mm/s. Les limites dépendent du type de bâtiment et de la fréquence dominante des vibrations, selon le tableau 2.3. Pour des fréquences dominantes au-dessus de 100 Hz, la limite pour 100 Hz s'applique. La dépendance de la fréquence est à interpréter comme suit ; la fréquence dominante est déterminée au moment du niveau vibratoire maximal. Ensuite, l'énergie vibratoire totale est attribuée à cette fréquence. En d'autres termes, la vitesse vibratoire maximale mesurée doit être comparée à la valeur limite.

type	nature du bâtiment	limite [mm/s]		
		1 – 10 Hz	10 – 50 Hz	50 – 100 Hz
1	commercial, industriel et similaire	20	20 – 40	40 – 50
2	habitations et similaire comme construction et / ou usage	5	5 – 15	15 – 20
3	structures sensibles	3	3 – 8	8 – 10

Tableau 2.3 Valeurs limites pour l'évaluation des effets des vibrations sur les bâtiments

La figure 2.3 montre les limites de manière graphique.

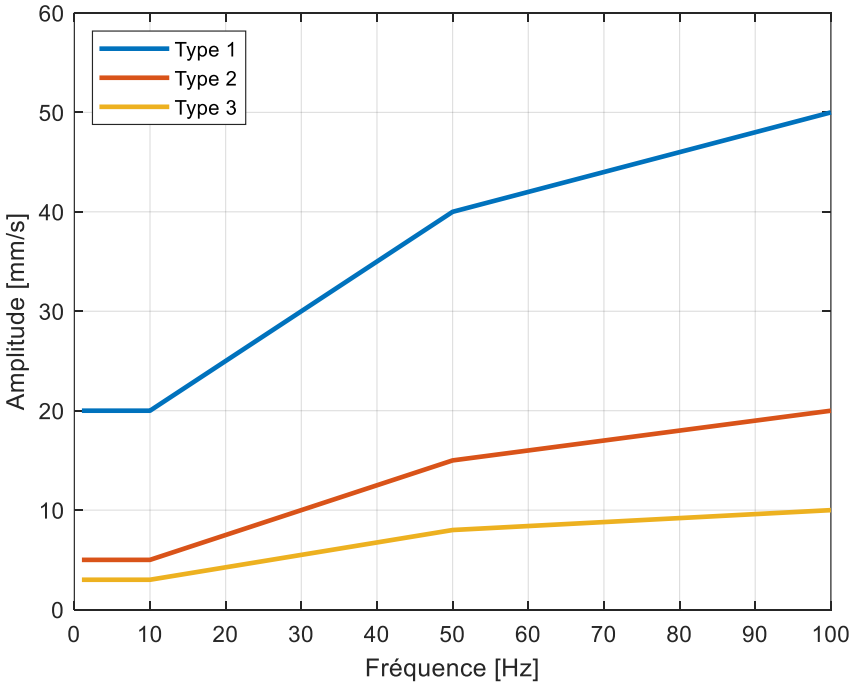


Figure 2.3 Représentation graphique des valeurs limites selon la norme DIN 4150-3

Comme le passage d'un tram ne provoque pas de niveaux vibratoires qui dépassent les limites de la norme DIN 4150-3 (sauf potentiellement dans des cas très particuliers), une évaluation spécifiquement dédiée à la norme DIN 4150-3 ne sera pas effectuée. Toutefois, le respect de la norme DIN 4150-2 garantit le respect de la norme DIN 4150-3, comme les limites applicables de la norme DIN 4150-2 sont significativement plus basses que celles de la norme DIN 4150-3.

2.3 BRUIT SOLIDIEN – VDI 2719

La norme VDI 2719 donne des valeurs limites pour le niveau de bruit maximal (L_{max}) à l'intérieur des pièces, selon la période de jour et le type de bâtiment.

type de bâtiment	période d'évaluation	niveau moyen sur tous les passages	niveau maximal pendant un passage
bureaux	jour	40 dB(A)	45 dB(A)
bâtiments avec des chambres à coucher	jour et nuit	40 dB(A) le jour 30 dB(A) la nuit	40 dB(A)
bâtiments avec des exigences spécifiques (e.g. studios)	jour et nuit	-	30 dB(A)

Tableau 2.4 Valeurs limites selon la norme VDI 2719

Le niveau moyen n'est pas spécifiquement évalué dans le reste du document ; quand le niveau maximal pendant un passage ne dépasse pas le niveau admissible, le niveau moyen sur tous les passages ne le fait non plus. Ceci est le résultat de la fréquence des passages par jour et par nuit. Le calcul est résumé ci-dessous.

- Nombre de passages
  - Par jour : 310
  - Par nuit : 47 (22h00 – 06h00)
- Durée d'un passage
  - La durée est maximale quand la vitesse est minimale ; c'est une hypothèse conservatrice, car le niveau de bruit solidien sera moins important quand la vitesse est réduite.
  - Longueur maximale d'un véhicule (plusieurs rames) ; 56 m
  - Temps de passages pour une vitesse de 80 km/h : 2.5 secondes
- On assume que, pendant le passage, le niveau du bruit maximal est présent. La correction à appliquer sur le niveau maximal est la suivante : $10 \times \log_{10}(T_p \times N/T)$, avec T_p le temps de passage, N le nombre de passages et T la durée de la période d'évaluation (jour / nuit)
  - Pour le jour : $10 \times \log_{10}(2.5 \times 310/(16 \times 60 \times 60)) = -18.7$ dB
  - Pour la nuit : $10 \times \log_{10}(2.5 \times 47/(8 \times 60 \times 60)) = -23.9$ dB

Pendant le jour, la différence entre le niveau maximal et le niveau moyen est donc 18.7 dB. Pendant la nuit, la différence est 23.9 dB. Avec une différence d'au maximum 10 dB entre le niveau maximal admissible et le niveau moyen admissible (pendant la nuit pour des bâtiments avec des chambres à coucher), le respect du niveau maximal garantit donc le respect du niveau moyen.

3 ÉTAT DES LIEUX VIBRATOIRE INITIAL

Ce chapitre présente les résultats des mesures vibratoires de l'état initial. Une campagne de mesure a été effectuée dans 6 sections dans la zone concernée, afin de déterminer l'état des lieux vibratoire. Les sections de mesure P1 à P6 sont montrées dans la figure 3.1. Des photos sont données dans les figures 3.2 à 3.7. À chaque section, les niveaux vibratoires ont été mesurés dans 3 points de mesure (V1 à V3).

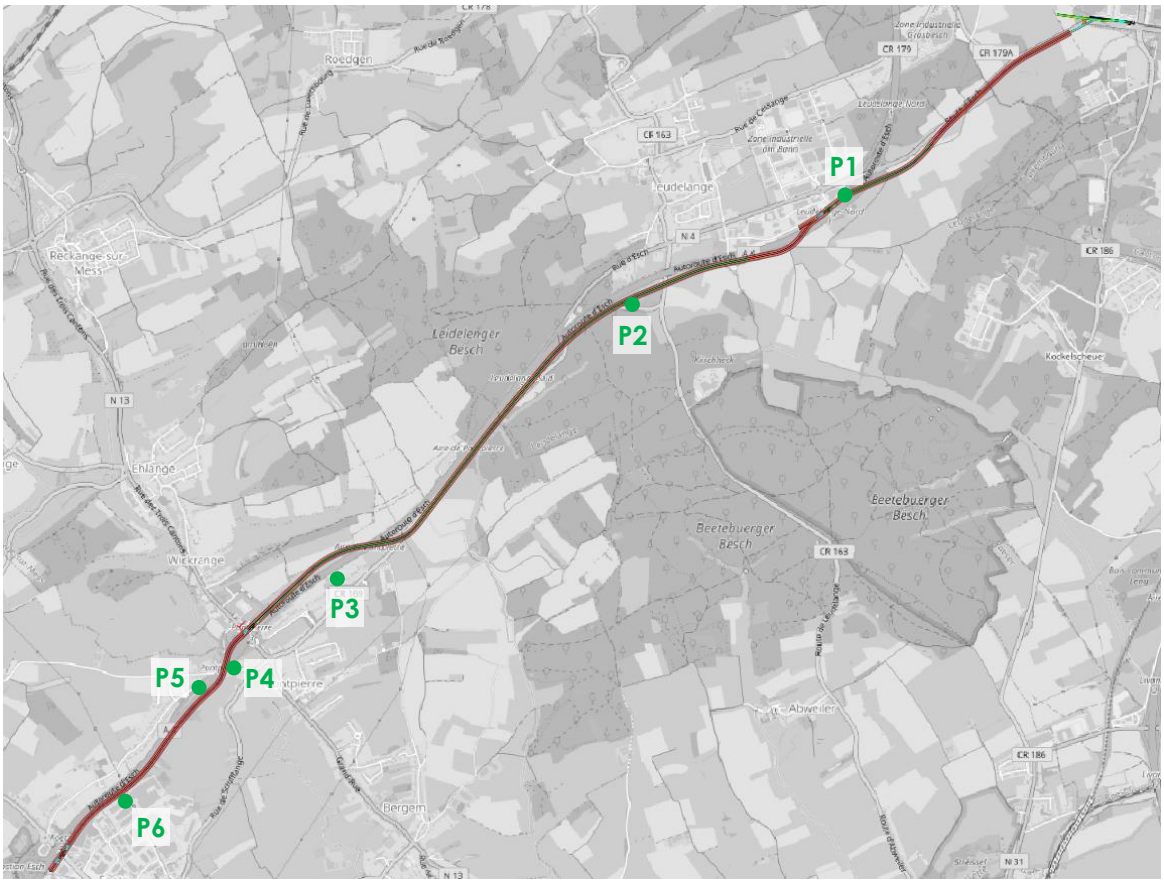


Figure 3.1 Localisation des sections de mesures vibratoires P1 à P6, Tracé optimisé

Les mesures ont été effectuées avec des accéléromètres dûment calibrés (conforme au manuel de qualité de D2S International) du type Wilcoxon 731A, et ceci le lundi 30-09-2024 entre 9h55 et 14h10.

Le tableau 3.1 résume les sections de mesure avec l'adresse et les coordonnées LUREF.

Point de mesure	Coordonnées (LUREF)	Adresse/ endroit
P1	73593 E | 69928 N	21, Rue de la Poudrerie, Leudelange
P2	72242 E | 69355 N	(CR 169) Région du Lias moyen, Leudelange
P3	70222 E | 67359 N	78, Rue d'Europe, Pontpierre
P4	69529 E | 66747 N	21, Rue d'Esch, Pontpierre

Point de mesure	Coordonnées (LUREF)	Adresse/ endroit
P5	69257 E | 66627 N	4, Rue Belle-Vue, Foetz
P6	68764 E | 65862 N	Foetzerkopp, Foetz

Tableau 3.1 Sections de mesures vibratoires P1 à P6





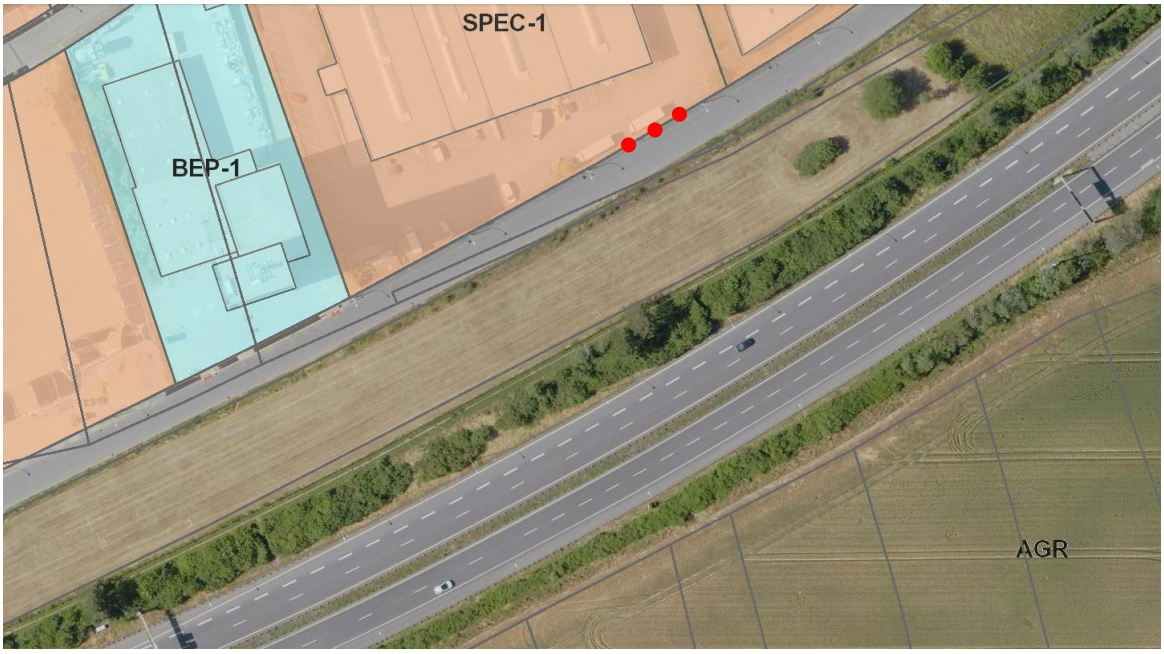


Figure 3.2 Section de mesures vibratoires P1 – 21, Rue de la Poudrerie (Leudelange)

La figure 3.2 montre des photos et la localisation sur le plan PAG de la section de mesure P1. La section est située dans la zone d'activités « Poudrerie » à une distance d'environ 50 mètres de l'autoroute A4. Dans la Rue de la Poudrerie, il y a uniquement du trafic de destination, surtout des bus et des camions, et du trafic traversant l'autoroute par « Al Strooss » vers le sud de l'autoroute.

La section de mesure P2 (figure 3.3) se trouve au bord de l'autoroute A4, à côté d'une zone d'intérêt communautaire Natura 2000 dénommée « Région du Lias moyen ». Les

vibrations venant de l'autoroute sont dominantes à cet endroit. La distance entre le point de mesure et l'autoroute est de 18 mètres.



Figure 3.3 Section de mesures vibratoires P2 – CR169, Région du Lias moyen (Leudelange)

La section de mesure P3 (figure 3.4) se trouve à la limite d'une zone d'habitation HAB-1, une zone résidentielle pure, sur un terrain où de nouvelles maisons seront bientôt construites. L'infrastructure tram sera construite entre l'autoroute A4 et les habitations de la rue d'Europe à Pontpierre, dans une zone de verdure (PAG). La distance entre la section de mesure et l'autoroute est de 80 mètres.

Bien que la section de mesure P3 soit plus pertinent pour la variante antérieure, il reste néanmoins pertinent pour la variante optimisée. Le point de mesure est situé au niveau des façades arrière des habitations de la rue d'Europe à Pontpierre, représentatif des zones résidentielles adjacentes, qui se trouvent à moins de 200 m de la future ligne de tramway (tracé optimisé). La distance entre l'autoroute A4 et le point de mesure est d'environ 80 mètres.



Figure 3.4 Section de mesures vibratoires P3 – 78, Rue d'Europe (Pontpierre)

La section de mesure P4 (figure 3.5) est située dans la rue d'Esch dans une zone d'habitation HAB-1 et proche d'un passage cycliste sous l'autoroute A4 et du site des travaux sur l'échangeur de Pontpierre. Ce projet a pour but la construction d'un échangeur sur l'autoroute A4 entre Luxembourg et Esch-sur-Alzette, au droit de la R.N. 13 à Pontpierre. Cet échangeur comprendra quatre bretelles venant se raccorder sur un nouveau rond-point créé sur la R.N. 13 en tenant compte de l'élargissement futur à 3 voies de l'autoroute. Le pont actuel au niveau de la rue d'Europe sera démoli.

À cause des travaux à l'autoroute, la vitesse de circulation est limitée et, par conséquent, les vibrations provenant de l'autoroute sont atténuées. D'autre part, une partie des vibrations provient probablement des travaux, bien que les mesures aient été effectuées en l'absence de travaux de démolition. La distance entre la section de mesure et l'autoroute est de 12 mètres.







Figure 3.5 Section de mesures vibratoires P4 – 21, Rue d'Esch (Pontpierre)

Au niveau de la section de mesure N4, il convient de noter que certains bâtiments environnants seront démolis (selon la variante choisie) afin de permettre la construction de la nouvelle ligne de tramway et de la future piste cyclable. Le tracé optimisé, qui enjambe l'autoroute A4 par un viaduc, se situera finalement plus loin des habitations restantes. Le point de mesure N4 reste très pertinent, car il est représentatif des habitations restantes dans cette zone résidentielle, qui se trouvent à une distance similaire de la ligne de tramway et de l'autoroute.La section de mesure P5 (figure 3.6) est située dans une zone d'habitation HAB-1, du côté nord de l'autoroute A4. Il n'y a presque pas de trafic de transit dans la rue Belle-Vue, car il s'agit d'un cul-de-sac. La distance entre les points de mesure et l'autoroute est de 50 mètres. La plupart des vibrations provient du trafic sur la bretelle actuelle en direction d'Esch-sur-Alzette.







Figure 3.6 Section de mesures vibratoires P5 – 4, Rue Belle-Vue (Foetz)

La section de mesure P6 (figure 3.7) est située dans la zone d'activités économiques de Foetz (terrain privé industriel) à côté de la piste cyclable « Foetzerkopp ». Les seules sources de vibrations proviennent de la circulation locale dans le parking de l'entreprise. La distance entre les points de mesure et l'autoroute est de 60 mètres.



Figure 3.7 Section de mesures vibratoires P6 – Foetzerkopp (Foetz)

Pour chaque section considérée, les niveaux vibratoires actuels dus aux bus, poids lourds et voitures sont mesurés. Les mesures ont été effectuées le 30-09-2024.

On mesure pour chaque section considérée :

— le niveau global en fonction du temps ;
— le niveau $L_{éq}$ pendant au minimum 30 minutes (dB réf. $1*10^{-9}$ m/s) ;
— le niveau L_{max} dans une période au minimum 30 minutes (dB réf. $1*10^{-9}$ m/s).

Les résultats sont donnés en détail dans l'annexe A. Les 3 graphiques de chacune de ces figures présentent :

— en haut l'évolution du niveau global pour les capteurs V1, V2 et V3 ;
— à gauche le spectre maximal dans la période de mesure ;
— à droite le spectre équivalent pendant la période de mesure pour les capteurs V1, V2 et V3.

La figure 3.8 donne un exemple de résultat pour la section P1.

PROJECT: Tram rapide Esch SECTION: P1
REC: REC001_01.mat REMARQUE: Plusieurs bus, voitures, poids lourds
TIME: 30/09/2024 09:56:01

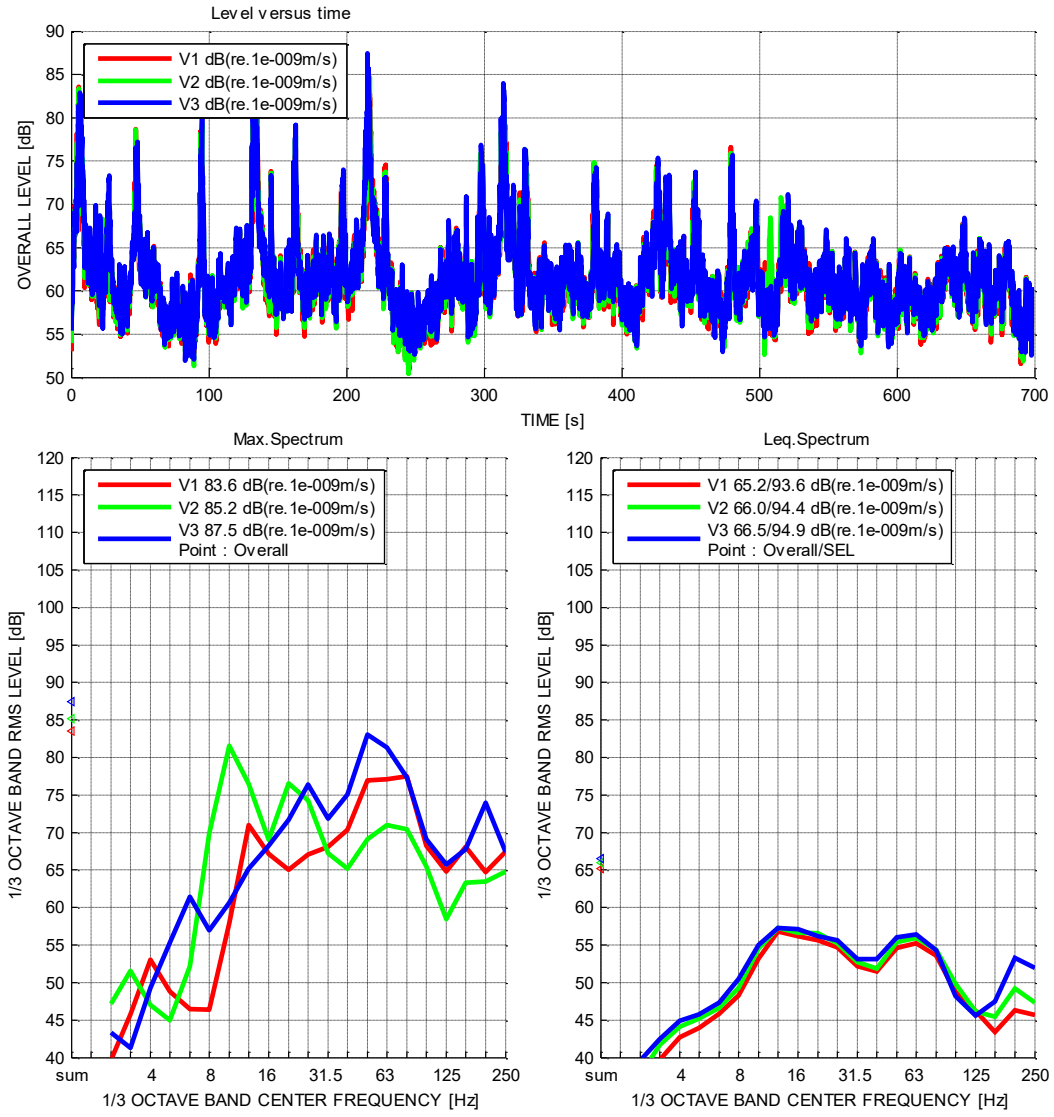


Figure 3.8 Exemple de résultat pour la section P1

Les résultats détaillés sont résumés au tableau 3.2 pour les sections P1 à P6. Le type des véhicules est indiqué, ainsi que le numéro de la page sur laquelle se trouve la figure correspondante dans l'annexe A qui donne les spectres mesurés. Le tableau 3.3 donne les résultats en valeurs KB.

Pour la section P1, les niveaux les plus élevés (bus et poids lourds) ont été causés par le trafic local sur la Rue de la Poudrerie. Pour la section P2, c'est le trafic sur l'autoroute A4 qui cause les niveaux vibratoires mesurés. Au niveau de la section P3, il n'y a pas beaucoup d'activités, comme les points de mesure se trouvent loin de la rue (Rue de l'Europe) et de l'autoroute A4. Ces points de mesure se trouvent au milieu d'un champ et à la limite d'un terrain où un projet immobilier est prévu. Pour la section P4, le trafic local (Rue de l'Europe) ainsi que le trafic sur l'autoroute A4 représentent la majorité des vibrations. À cause des travaux sur le nouvel échangeur de Pontpierre, certaines vibrations peuvent être provoquées par des camions ou des grues. Les points de mesure se trouvent proches d'une zone où certains bâtiments seront démolis pour faire place à la ligne de tramway. Au niveau de la section P5, la plupart des vibrations provient du trafic sur la bretelle actuelle en direction d'Esch-sur-Alzette. Les points de mesure de la section P6 se situent sur un terrain privé dans la zone d'activités économiques de Foetz. Les sources de vibrations sont la circulation locale dans le parking de l'entreprise, les activités des entreprises et très peu l'autoroute A4, située à 60 m des points de mesure. Le point V2 de la section P6 n'a pas été rapporté dans les tableaux en raison d'une anomalie.

Les mesures « état initial » sont des mesures de référence. Une évaluation directe n'est pas possible, comme les mesures ont été effectuées à l'extérieur des bâtiments, bien que la norme DIN 4150-2 nécessite une mesure à l'intérieur. Toutefois, en tenant compte de la position des points de mesure, une évaluation indirecte est possible.

Avec des niveaux maximaux qui restent nettement en dessous de 85 dB (KB_{Fmax} = 0.02), il est fort probable que le seuil de perception de 100 dB (KB = 0.1) ne soit pas dépassé à l'intérieur d'un bâtiment, même après une amplification structurelle causée par les planchers des différentes pièces.

Dans la section P2, proche de l'autoroute, et la section P5, proche de la bretelle de l'autoroute, des niveaux de l'ordre de 90 dB (KB_{Fmax} = 0.03) sont enregistrés, mais comme il s'agit des mesures sur le sol, l'effet du découplage sol-structure n'est pas pris en considération. Aussi pour ces deux sections, il est fort probable que le seuil de perception ne soit pas dépassé à l'intérieur d'un bâtiment.

En résumant, sur la base des mesures de l'état actuel, il est fort probable que les niveaux vibratoires actuels ne dépassent pas les exigences de la norme DIN 4150-2.

section	record_ID	heure	Remarques	niveau vibratoire en dB (re. 1 e-9m/s)						page annexe B
				L_{max}			$L_{éq}$			
				V1	V2	V3	V1	V2	V3	
P1	REC001_01	09:56:01	Trafic local: Plusieurs bus, voitures, poids lourds	83.6	85.2	87.5	65.2	66.0	66.5	B - 1
P1	REC001_02	10:07:41	Trafic local: Plusieurs bus, voitures, poids lourds	83.1	86.7	88.0	66.0	66.9	67.5	B - 2
P1	REC001_03	10:19:21	Trafic local: Plusieurs bus, voitures, poids lourds	86.7	89.7	89.5	68.7	69.6	70.0	B - 3
P2	REC002_01	10:46:08	Autoroute: Plusieurs bus, voitures, poids lourds	91.5	90.0	88.0	74.8	74.0	73.7	B - 4
P2	REC002_02	10:56:58	Autoroute: Plusieurs bus, voitures, poids lourds	92.1	89.1	89.5	74.7	73.7	73.5	B - 5
P2	REC002_03	11:07:48	Autoroute: Plusieurs bus, voitures, poids lourds	92.4	90.8	90.3	75.3	74.3	73.8	B - 6
P3	REC003_01	11:36:14	Autoroute à 80 m : Poids lourds et bus	79.6	79.5	79.8	60.5	60.4	60.7	B - 7
P3	REC003_02	11:47:04	Autoroute à 80 m : Poids lourds et bus	73.6	74.7	73.6	59.9	60.3	59.9	B - 8
P3	REC003_03	11:57:54	Autoroute à 80 m : Poids lourds et bus	81.5	78.6	81.4	62.0	61.8	61.9	B - 9
P4	REC004_01	12:19:38	Autoroute et trafic local (travaux)	79.6	80.8	87.5	61.9	63.0	66.0	B - 10
P4	REC004_02	12:30:28	Autoroute et trafic local (travaux)	76.1	76.1	76.5	61.1	61.4	62.1	B - 11
P4	REC004_03	12:41:18	Autoroute et trafic local (travaux)	75.2	76.5	77.4	63.0	63.8	64.2	B - 12
P5	REC006_01	14:25:58	Trafic sur bretelle autoroute, circulation locale	89.2	90.0	91.1	69.8	71.3	70.5	B - 13
P5	REC006_02	14:39:18	Trafic sur bretelle autoroute, circulation locale	86.1	89.3	87.1	69.3	71.0	70.0	B - 14
P5	REC006_03	14:52:38	Trafic sur bretelle autoroute, circulation locale	80.5	82.2	82.4	67.2	68.6	67.9	B - 15
P6	REC005_01	13:35:59	Autoroute à 60 m : Poids lourds et bus (activités entreprises)	75.9	-	79.3	63.6	-	65.5	B - 16
P6	REC005_02	13:45:59	Autoroute à 60 m : Poids lourds et bus (activités entreprises)	72.4	-	76.7	63.6	-	64.9	B - 17
P6	REC005_03	13:55:59	Autoroute à 60 m : Poids lourds et bus (activités entreprises)	73.5	-	77.8	63.4	-	65.6	B - 18

Tableau 3.2 Résultats des mesures de l'état actuel vibratoire – valeurs exprimées en dB

section	record_ID	heure	Remarques	niveau vibratoire en KB KB_{Fmax}			page annexe B
				V1	V2	V3	
P1	REC001_01	09:56:01	Trafic local : Plusieurs bus, voitures, poids lourds	0.02	0.02	0.02	B - 1
P1	REC001_02	10:07:41	Trafic local : Plusieurs bus, voitures, poids lourds	0.01	0.02	0.03	B - 2
P1	REC001_03	10:19:21	Trafic local : Plusieurs bus, voitures, poids lourds	0.02	0.03	0.03	B - 3
P2	REC002_01	10:46:08	Autoroute : Plusieurs bus, voitures, poids lourds	0.04	0.03	0.03	B - 4
P2	REC002_02	10:56:58	Autoroute : Plusieurs bus, voitures, poids lourds	0.04	0.03	0.03	B - 5
P2	REC002_03	11:07:48	Autoroute : Plusieurs bus, voitures, poids lourds	0.04	0.03	0.03	B - 6
P3	REC003_01	11:36:14	Autoroute à 80 m : Poids lourds et bus	0.01	0.01	0.01	B - 7
P3	REC003_02	11:47:04	Autoroute à 80 m : Poids lourds et bus	0.00	0.01	0.00	B - 8
P3	REC003_03	11:57:54	Autoroute à 80 m : Poids lourds et bus	0.01	0.01	0.01	B - 9
P4	REC004_01	12:19:38	Autoroute et trafic local (travaux)	0.01	0.01	0.02	B - 10
P4	REC004_02	12:30:28	Autoroute et trafic local (travaux)	0.01	0.01	0.01	B - 11
P4	REC004_03	12:41:18	Autoroute et trafic local (travaux)	0.01	0.01	0.01	B - 12
P5	REC006_01	14:25:58	Trafic sur bretelle autoroute, circulation locale	0.03	0.03	0.04	B - 13
P5	REC006_02	14:39:18	Trafic sur bretelle autoroute, circulation locale	0.02	0.03	0.02	B - 14
P5	REC006_03	14:52:38	Trafic sur bretelle autoroute, circulation locale	0.01	0.01	0.01	B - 15
P6	REC005_01	13:35:59	Autoroute à 60 m : Poids lourds et bus (activités entreprises)	0.01	-	0.01	B - 16
P6	REC005_02	13:45:59	Autoroute à 60 m : Poids lourds et bus (activités entreprises)	0.00	-	0.01	B - 17
P6	REC005_03	13:55:59	Autoroute à 60 m : Poids lourds et bus (activités entreprises)	0.00	-	0.01	B - 18

Tableau 3.3 Résultats des mesures de l'état actuel vibratoire – valeurs exprimées en KB

4 MÉTHODOLOGIE DU CALCUL

Lors du passage d'un tramway sur la voie, l'effort dynamique au contact roue-rail entraîne la mise en vibration du sol sous-jacent. Les vibrations du sol sont transmises, via le sol environnant, aux fondations des bâtiments riverains.

Les vibrations de ces fondations sont amplifiées dans le bâtiment à certaines fréquences correspondant aux fréquences de résonance des éléments structurels. Enfin, la vibration des parois d'une salle entraîne même la vibration de l'air contenu dans cette salle, ce qui se traduit par un bruit sourd typique, appelé le « bruit solidien ».

La figure 4.1 montre schématiquement la transmission des vibrations de la voie aux bâtiments.

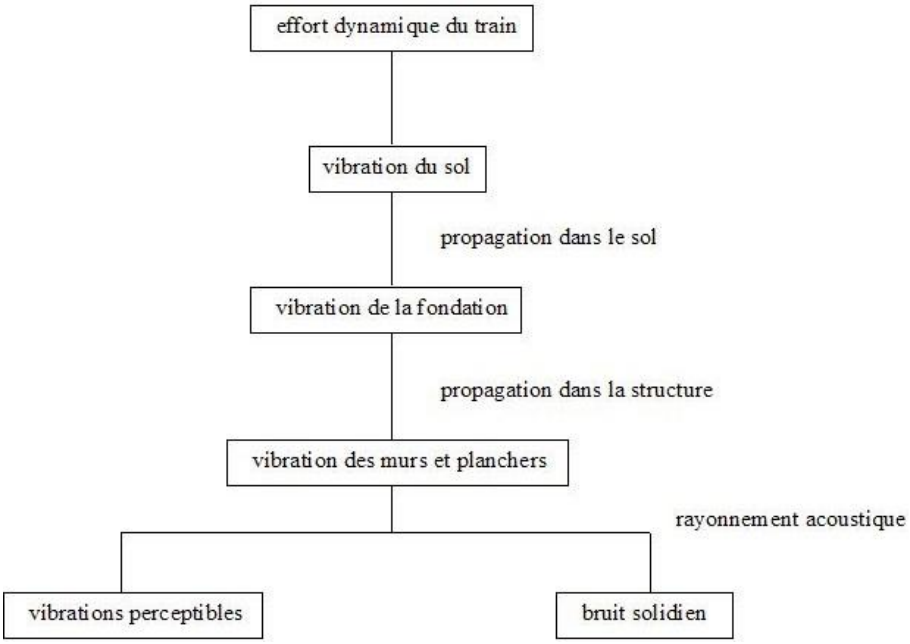


Figure 4.1 Transmission des vibrations

Afin d'estimer les niveaux vibratoires sur le sol, devant les fondations des bâtiments riverains et à l'intérieur, il faut quantifier :

- la source ; l'effort dynamique généré par le tram au contact roue-rail ; la connaissance des spectres de densité de force du matériel roulant sur la voie ;
- la transmission ; la propagation des vibrations dans le sol ; la mesure de transmissibilité du sol en différents endroits le long du tracé ;
- le récepteur ; le couplage sol-fondations et l'amplification structurelle.

Les niveaux vibratoires ainsi estimés doivent ensuite être comparés aux niveaux admissibles. En cas de dépassement, des mesures de mitigation vibratoire seront proposées. L'atténuation vibratoire apportée par le système de voie peut être mesurée ou calculée.

Les différents aspects de la prédiction vibratoire sont élaborés dans les paragraphes suivants.

4.1 LA SOURCE VIBRATOIRE ; LE SPECTRE DE DENSITÉ DE FORCE

La source vibratoire des trams dépend du type de tram et du type de pose de voie. Idéalement, cette source, exprimée en forme de spectre de densité d'effort, est déterminée sur la base d'une mesure in situ, du même type de tram sur le même type de voie.

D2S International a effectué une mesure à Luxembourg afin de déterminer le spectre de densité d'effort du tram. La figure 4.2 montre quelques photos de cette mesure.



Figure 4.2 Mesure du spectre de densité d'effort du tram à Luxembourg

La figure 4.3 montre le spectre de densité d'effort obtenu, pour une vitesse de 50 km/h. Si le calcul doit être effectué pour une autre vitesse, le spectre est corrigé selon la formule suivante :

$$\Delta = 20 \log_{10}\left(\frac{v}{v_{ref}}\right)$$

Avec v la vitesse de calcul et v_{ref} la vitesse à laquelle le spectre de densité d'effort a été déterminé (dans ce cas 50 km/h).

Ce spectre a été déterminé pour le tram qui roule sur les lignes existantes. Il s'agit d'un tram de 8 modules avec une longueur de 45 m, bien que la nouvelle ligne soit exploitée

avec des trams avec 10 modules et une longueur de 56 m. Toutefois, la longueur n'a aucune influence sur le spectre de densité d'effort.

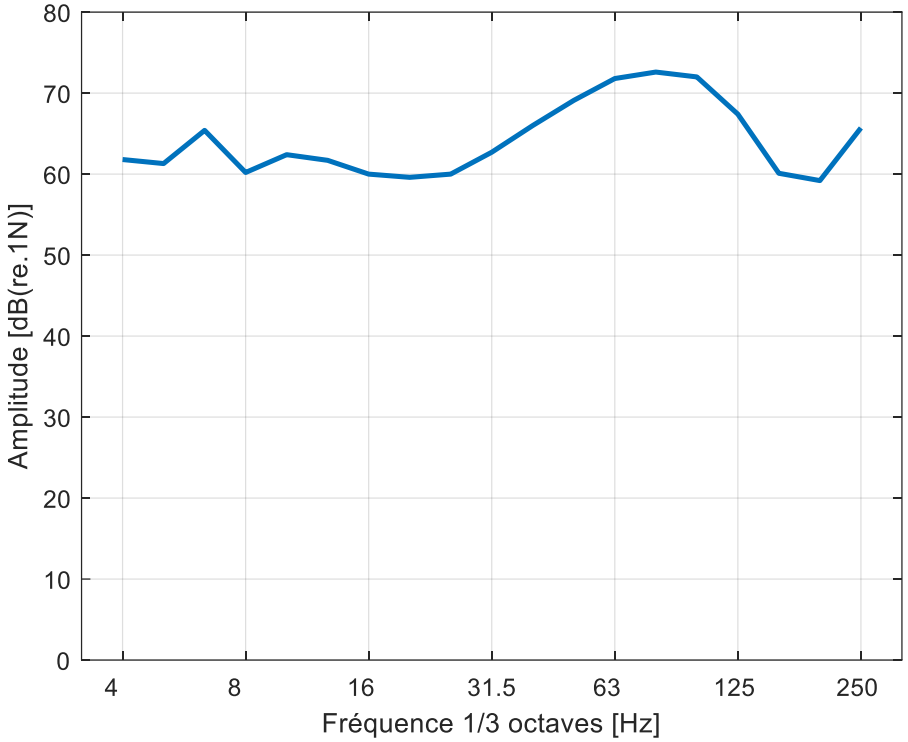


Figure 4.3 Spectre de densité d'effort à 50 km/h

4.2 LA TRANSMISSION VIBRATOIRE

4.2.1 L'interaction sol-structure entre les fondations du viaduc et le sol

Trois viaducs sont pris en compte dans l'analyse de la propagation des vibrations :

- Leudelange : entre PM 2150 et PM 3000
- Pontpierre : entre PM 7600 et PM 8613.6
- Foetz : entre PM 9700 et PM 10 047.4

Un exemple (coupe) du viaduc à Pontpierre est montré dans la figure 4.4. Les viaducs sont conçus comme des ouvrages en acier lesquels reposent sur des fondations sur pieux.

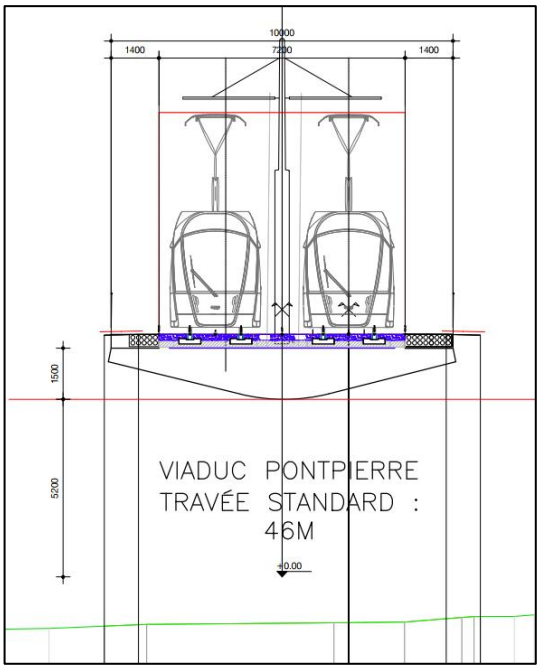


Figure 4.4 Viaduc à Pontpierre

Comme pour les bâtiments, un phénomène de découplage de la transmission vibratoire se produit également dans le cas de structures lourdes telles que les ponts et les viaducs. Lorsqu'un tram circule sur un viaduc, les vibrations générées par l'interaction roue-rail ne sont pas transmises intégralement au sol environnant. La masse importante et la rigidité de l'ouvrage modifient la propagation dynamique des vibrations et créent un effet d'atténuation entre la structure et le terrain adjacent. Ce mécanisme agit comme un filtre dynamique réduisant l'énergie vibratoire transférée vers les sols voisins. Par conséquent, les niveaux vibratoires mesurés à proximité du viaduc sont généralement inférieurs à ceux observés pour une infrastructure directement en contact avec le sol.

La figure 4.5 présente la caractéristique de découplage retenue dans le cadre de l'étude. Celle-ci montre une atténuation progressive de l'interaction sol-structure en fonction de la fréquence, atteignant environ –10 dB à partir de 50 Hz. Cela signifie que les composantes vibratoires de moyenne et haute fréquence transmises vers le terrain adjacent sont

significativement réduites par la présence du viaduc. Cette hypothèse de découplage est intégrée dans les calculs afin de représenter de manière réaliste la diminution de la transmission vibratoire vers l'environnement.

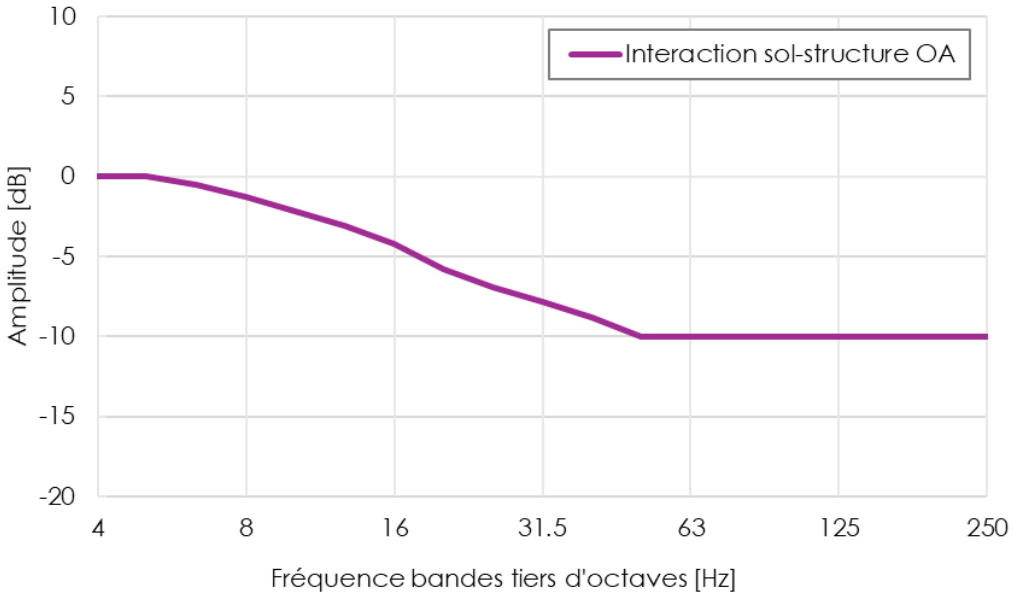


Figure 4.5 Interaction sol-structure – Ouvrage d'art (Viaduc)

4.2.2 La transmission du sol

Des mesures de transmissibilité ont été effectuées en trois sections le long du futur tracé, dont les localisations sont données dans la figure 4.6. La localisation des différentes mesures de transmissibilité est telle qu'un échantillon représentatif est obtenu du comportement du sol sur tout le tracé. Sur la base des données géotechniques (figure 1.2) préliminaires reçues, la variation du type de sol est faible sur le périmètre du projet.



Figure 4.6 Mesures de transmission – localisation des points de mesure le long du tracé, Tracé optimisé

Les mesures de transmissibilité consistent à exciter le sol par l'intermédiaire d'une masse équipée d'un capteur d'effort, et à mesurer la réponse vibratoire en différentes positions, en même temps que l'effort appliqué. Pour chaque section, une seule transmission a été mesurée, mais pour plusieurs distances entre le point d'impact et le capteur. Cela permet de calculer le niveau vibratoire à plusieurs distances de la voie et ainsi la distance minimale nécessaire afin de rester en dessous des critères.

Les réponses ont été mesurées pour les distances de 2, 3, 4, 6, 8, 12, 16, 24, 32 et 48 mètres (V1 à V10). Les fonctions de transfert vibratoire sont calculées pour chaque point de réponse. Les courbes de transmissibilité, ensemble avec une photo de la mesure, sont visualisées aux figures 4.7 à 4.9. Les figures ne montrent pas les courbes mesurées, mais celles après interpolation, de sorte que l'atténuation vibratoire est monotone avec la distance.



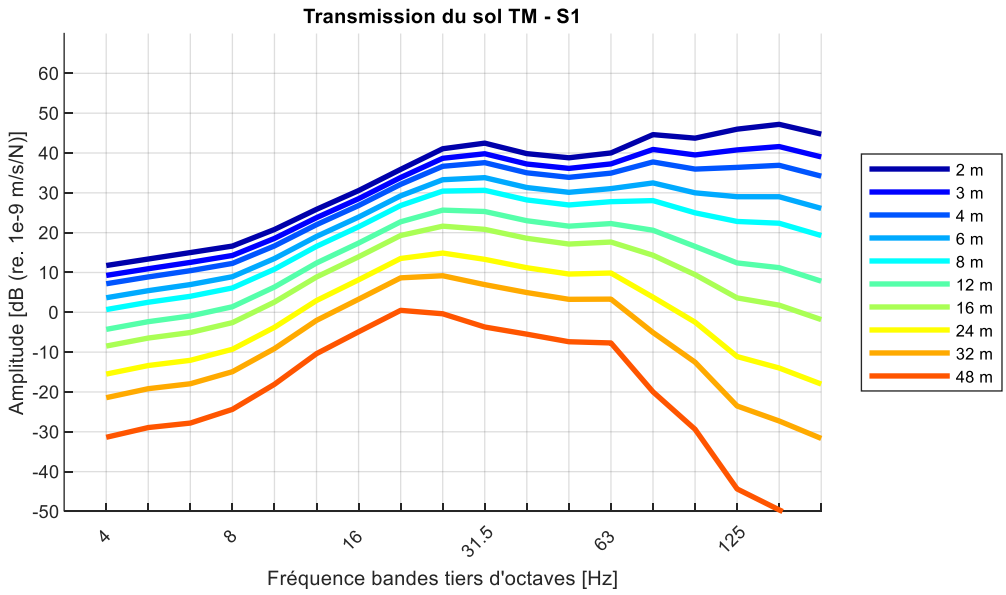


Figure 4.7 Section S1 : courbes de transmissibilité



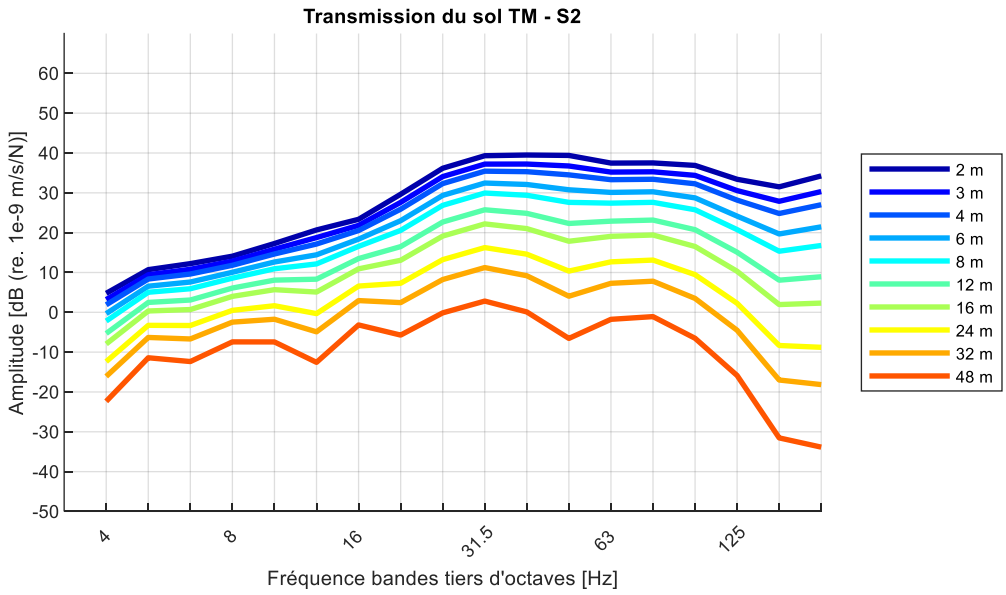


Figure 4.8 Section S2 : courbes de transmissibilité



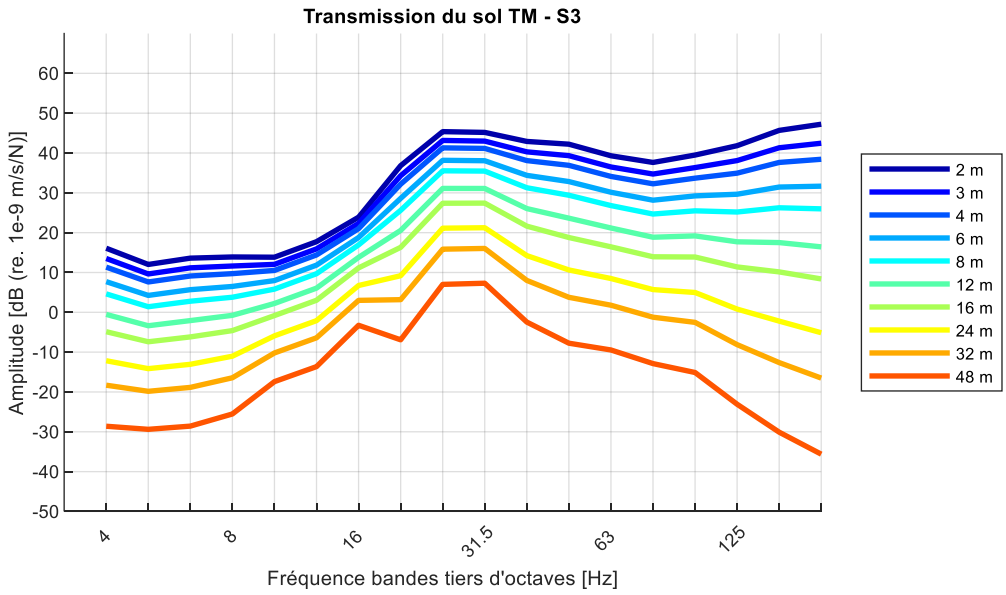


Figure 4.9 Section S3 : courbes de transmissibilité

Ces 3 courbes de transmissibilité ont été utilisées pour les calculs des niveaux vibratoires (et de bruit solidien) dans les bâtiments concernés, en fonction de leur localisation géographique. Généralement, trois différentes couches géologiques ont été remarquées dans la zone étudiée. Les courbes de transmissibilité utilisées pour les calculs ont été basées sur ces zones, comme montre la figure 4.10.

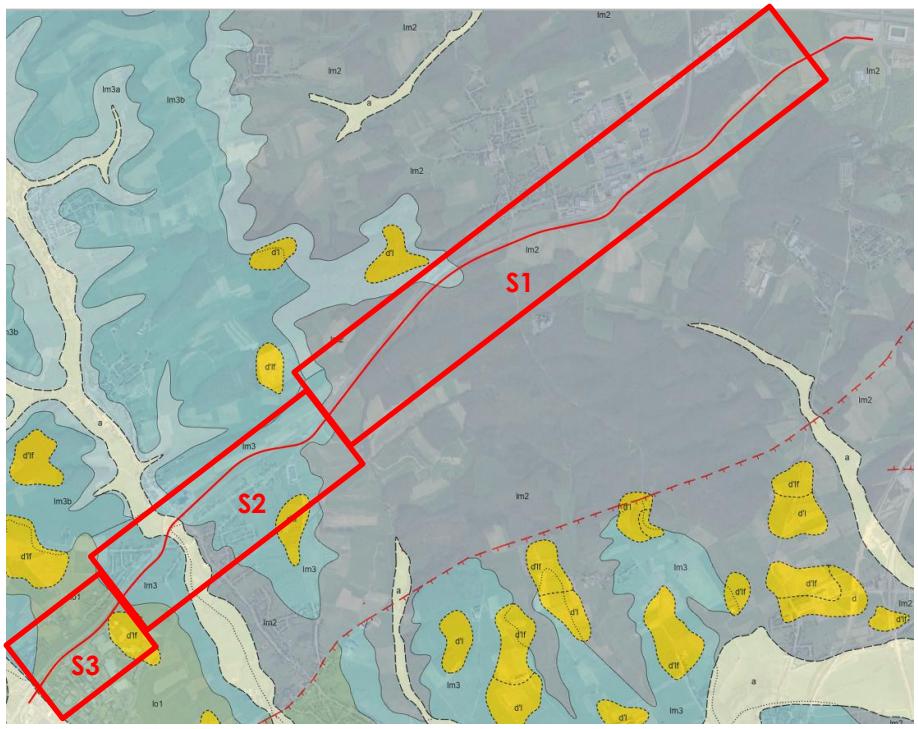


Figure 4.10 Carte géologique, « Tracé optimisé »

4.3 LE RÉCEPTEUR

Le récepteur, le bâtiment, influence les niveaux vibratoires de deux manières.

- Couplage sol-fondations ; quand les vibrations « entrent » dans le bâtiment, elles sont atténuées à cause de l'interaction entre le sol et le bâtiment. Cette atténuation dépend entre autres du type de sol et de la masse du bâtiment. La hauteur du bâtiment a une influence indirecte sur ce couplage sol-fondations ; un bâtiment plus haut est généralement plus lourd. Un bâtiment plus lourd apporte une atténuation plus importante ; la fréquence de découplage (la fréquence à partir de laquelle une atténuation est observée) est généralement plus faible et l'atténuation vibratoire dans les hautes fréquences est plus importante.
- L'amplification structurelle ; dans le bâtiment, les vibrations sont amplifiées à cause des résonances structurelles du bâtiment, surtout des planchers. Cette amplification dépend de la structure du bâtiment et de la taille des pièces.

Dans le cadre d'une étude prédictive, il n'est pas possible de mesurer le comportement de tous les récepteurs le long du tracé. Pour cette raison, une hypothèse conservatrice est considérée pour le calcul des niveaux vibratoires à l'intérieur des bâtiments.

La figure 4.11 montre l'amplification et le couplage sol-structure appliqué dans les calculs.

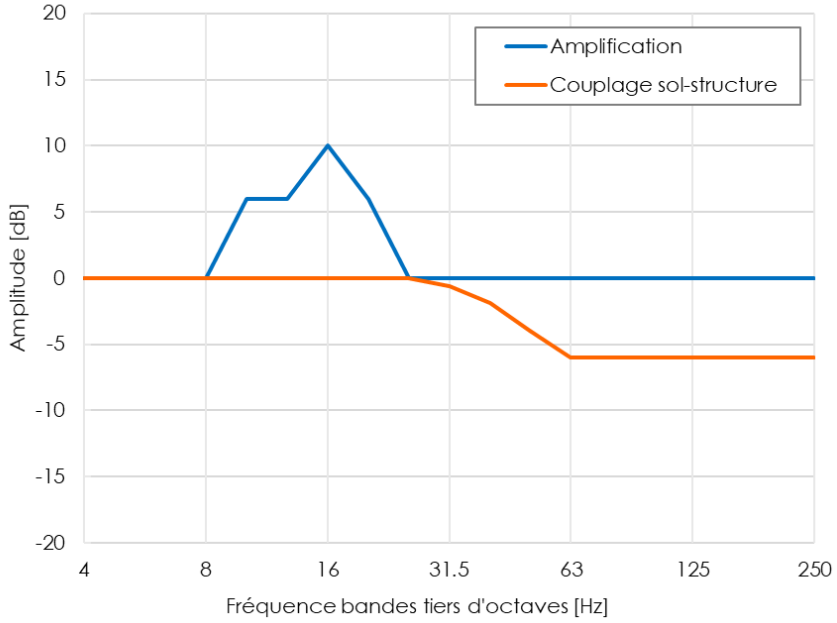


Figure 4.11 Amplification et couplage sol-structure

Finalement, les vibrations des planchers et des murs sont rayonnées comme du bruit solidien ; un bruit plutôt basse fréquence, causé par les vibrations. Le niveau du bruit solidien est calculé à partir du niveau vibratoire, avec la formule suivante :

$$L_p = L_V + C_A - 22$$

avec L_p le niveau de bruit, L_v le niveau vibratoire (calculé), C_A le filtre « A » et finalement un facteur « -22 » qui détermine le rapport entre le niveau vibratoire et le niveau de bruit. Ce facteur dépend des caractéristiques acoustiques de la pièce. Une valeur de -22 dB constitue une hypothèse conservatrice.

Ce rapport est basé sur les formules suivantes :

— Le bruit rayonné par une structure vibrante

$$W = \sigma \rho c S v^2$$

  — W ; la puissance rayonnée
  — σ : l'efficacité de rayonnement
  — ρc : environ 400 pour l'air (densité multipliée par la vitesse de propagation)
  — S : la surface qui rayonne le bruit
  — v²: vitesse vibratoire

— Le rapport entre la pression acoustique et la puissance dans un grand volume (champ diffus)

$$p^2 = 4\rho c \frac{W}{A}$$

  — A : l'absorption dans le volume, exprimée en m² d'absorption parfaite

— Formule de Sabine

$$T = 0.161\frac{V}{A}$$

  - V : le volume
  - T : le temps de réverbération

Avec les hypothèses suivantes :

— W_0 = 1^{e-12} W
— P_0 = 2^{e}-5 Pa
— V_0 = 1^{e}-9 m/s
— T = 2 s
— H = la hauteur du volume = 3 m
— σ = 1
— Seulement le sol ou le plafond rayonne

et en considérant la pondération « A », ceci mène à la relation citée ci-dessus. Avec un temps de réverbération de 2 s, une valeur élevée, il est clair qu'il s'agit d'une hypothèse conservatrice.

4.4 PRÉDICTIONS ET PRÉCONISATIONS DE MESURES À PRENDRE

4.4.1 Variante « Tracé antérieur » relative à l'étude N5874/R04C

La vitesse vibratoire calculée est obtenue par multiplication du spectre de densité de force du tram avec la transmissibilité du sol et les courbes du récepteur, en tenant compte de la vitesse du tram et de la présence d'un appareil de voie.

Le profil de vitesses considérées est montré à la figure 4.12. Dans une approche conservatrice, la vitesse maximale de 80 km/h est considérée pour les calculs. Au niveau des arrêts (Leudelange, Pontpierre et Foetz), une vitesse de 40 km/h est considérée.

L'effet de la vitesse des trams est pris en considération avec un facteur de correction :

$$C = 20\log_{10}\frac{v}{v_{ref}}$$

avec v_{ref} la vitesse avec laquelle le spectre de densité d'effort a été déterminé et « v » la vitesse de calcul.

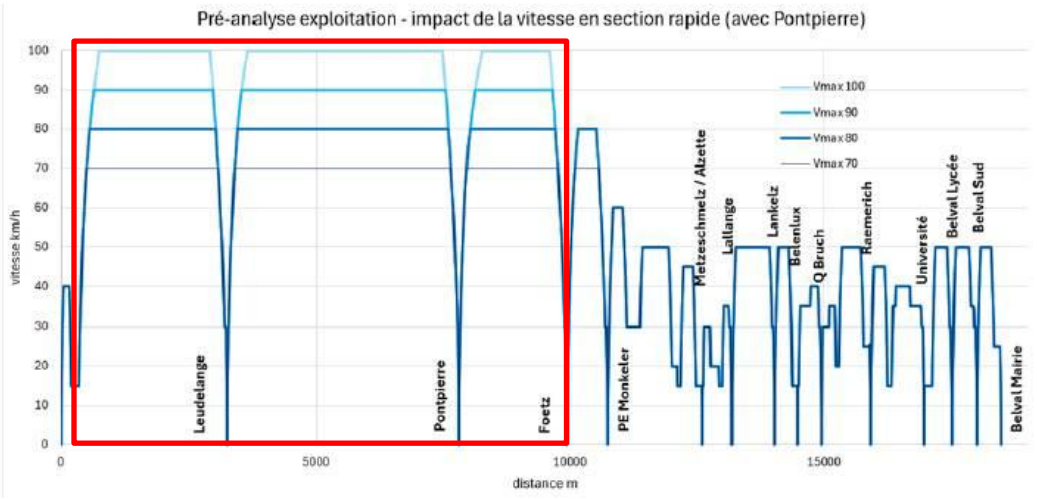


Figure 4.12 Diagramme des vitesses (pré-analyse exploitation)

L'effet d'un appareil de voie est pris en considération en appliquant un facteur de correction de +10 dB sur toute la gamme de fréquences.

Le nombre de passages par jour et par nuit dépend de l'horaire des fréquences de passage des trams, comme illustré au tableau 4.1. Sur la base de cet horaire, le nombre de trams par jour (06h00-22h00) pendant la semaine (la période avec la fréquence la plus importante) est de 310, et le nombre de trams par nuit (22h00-06h00) est de 47 pour les 2 voies ensemble.

Jour	Période		Fréquence [minutes]
	Début	Fin	
Lundi / Samedi	04:00	05:00	15
	05:00	06:00	8
	06:00	20:00	6
	20:00	22:00	8
	22:00	01:00	15
Dimanche	05:30	10:00	15
	10:00	20:00	8
	20:00	00:30	15

Tableau 4.1 Tableau horaire des fréquences de passage des trams, « Tracé antérieur »

4.4.2 Variante « Tracé optimisé »

La vitesse vibratoire calculée est obtenue par multiplication du spectre de densité de force du tram avec la transmissibilité du sol et les courbes du récepteur, en tenant compte de la vitesse du tram et de la présence d'un appareil de voie.

Le profil de vitesses considérées est montré à la figure 4.13. Dans une approche conservatrice, la vitesse maximale de 100 km/h est considérée pour les calculs. Les vitesses

réellement utilisées pour la présentation des résultats sont représentées par la courbe orange. Le modèle ne permettant pas d'introduire un profil de vitesse variable, cette courbe prudente, dérivée de la courbe fuchsia, a été utilisée. Au niveau des appareils de voie (à Leudelange, Pontpierre et Foetz), une vitesse de 50 km/h est considérée.

L'effet de la vitesse des trams est pris en considération avec un facteur de correction :

$$C = 20 \log_{10} \frac{v}{v_{ref}}$$

avec v_{ref} la vitesse avec laquelle le spectre de densité d'effort a été déterminé et « v » la vitesse de calcul.

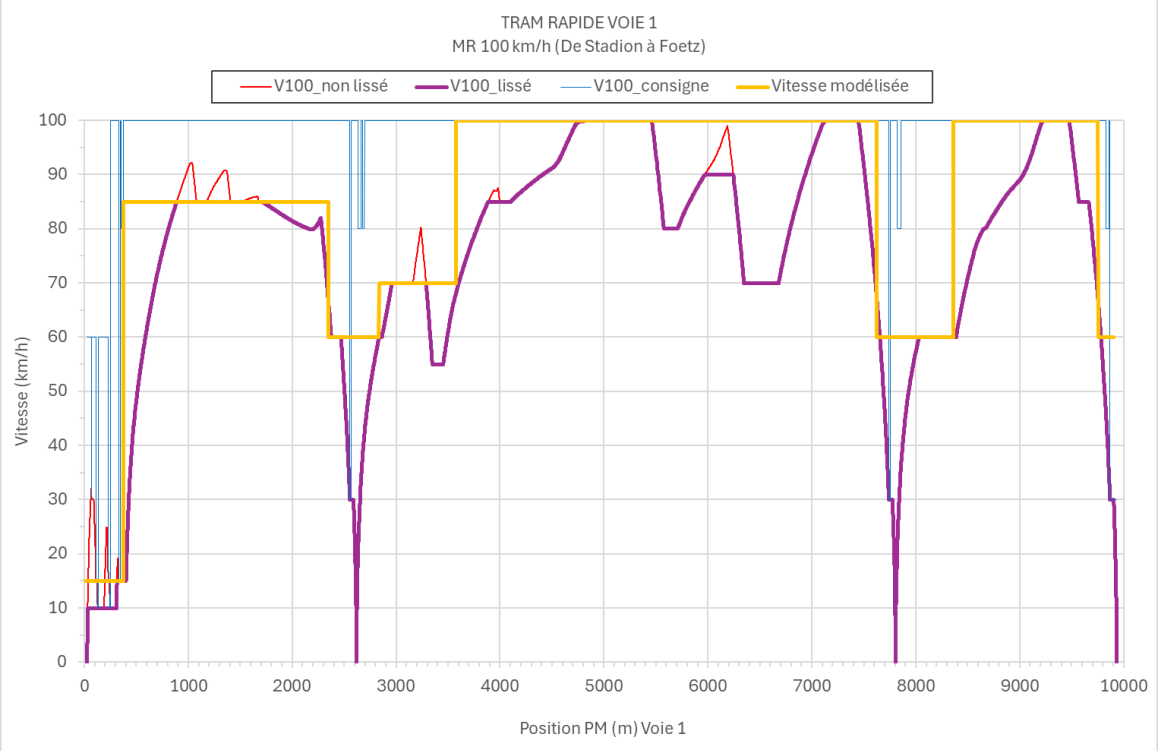


Figure 4.13 Diagramme des vitesses (pré-analyse exploitation)

L'effet d'un appareil de voie est pris en considération en appliquant un facteur de correction de +10 dB sur toute la gamme de fréquences.

Le nombre de passages par jour et par nuit dépend de l'horaire des fréquences de passage des trams, comme illustré au tableau 4.2. Sur la base de cet horaire, le nombre de trams par jour (06h00-22h00) pendant la semaine (la période avec la fréquence la plus importante) est de 310, et le nombre de trams par nuit (22h00-06h00) est de 47 pour les 2 voies ensemble.

Il existe également un scénario prévoyant une augmentation de la fréquence des trams pendant la journée (de 6h à 20h) entre Stadion et Leudelange. Dans cette variante, la fréquence des trams passe de 6 minutes (soit 10 trams par heure) à 5 minutes (soit 12 trams

par heure). Sur le reste du tracé (Leudelange à Foetz), la fréquence des trams reste inchangée.

Jour	Période		Fréquence [minutes]
	Début	Fin	
Lundi / Samedi	04:00	05:00	15
	05:00	06:00	8
	06:00	20:00	6 (Variante : 5)
	20:00	22:00	8
	22:00	01:00	15
Dimanche	05:30	10:00	15
	10:00	20:00	8
	20:00	00:30	15

Tableau 4.2 Tableau horaire des fréquences de passage des trams, « Tracé optimisé »

4.4.3 Mesures antivibratoires (le cas échéant)

Avec la méthode décrite ci-dessus, le comportement du terrain environnant est pris en considération. Ce résultat est ensuite comparé aux exigences du projet. En cas de dépassement, des mesures antivibratoires seront proposées. Il s'agit de 3 systèmes de pose de voie antivibratoire, un système dit « - 8 dB », un système « - 16 dB » et finalement un système « - 20 dB ». Il s'agit des systèmes standards proposés par EGIS.

La performance des systèmes antivibratoires est définie comme une perte par insertion, par rapport au système de référence. La figure 4.14 montre la perte par insertion exigée des systèmes antivibratoires. Il ne s'agit pas de courbes correspondant à un système spécifique, mais des courbes appliquées dans les calculs. Du fait, il s'agit de la performance minimale demandée. Évidemment, les courbes correspondent à des solutions réalisables en pratique. Les courbes pour les systèmes « - 16 dB » et « - 20 dB » sont reprises de l'étude vibratoire du tronçon, de sorte que les résultats soient cohérents. Toutefois, l'amplification au pic de résonance de plus de 10 dB pour le système « - 16 dB » et de plus de 15 dB pour le système « - 20 dB » est un pic théorique et n'est généralement pas observé dans des mesures.

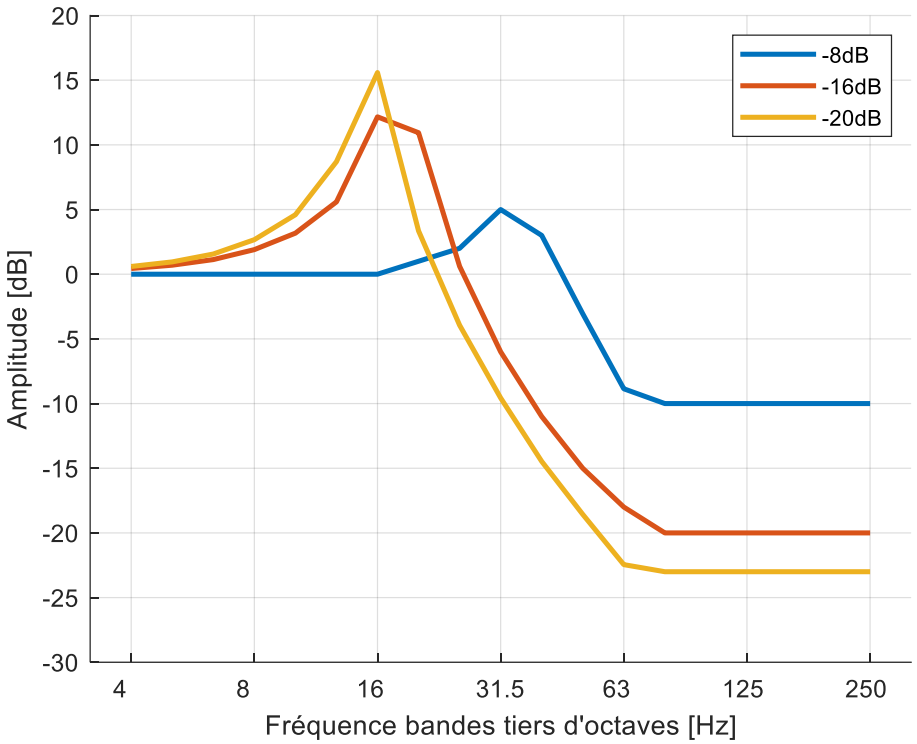


Figure 4.14 Performance exigée (perte par insertion) des systèmes antivibratoires

5 RÉSULTATS DES CALCULS

La figure 5.1 montre un exemple d'un résultat de calcul. Les calculs ont été faits pour la voie de référence sans et avec appareil de voie et le cas échéant pour une voie « - 8 dB », une voie « - 16 dB » et une voie « - 20 dB », type dalle flottante.

Pour la variante « Tracé optimisé », des calculs ont également été effectués en considérant la caractéristique de découplage au niveau des ouvrages (viaducs).

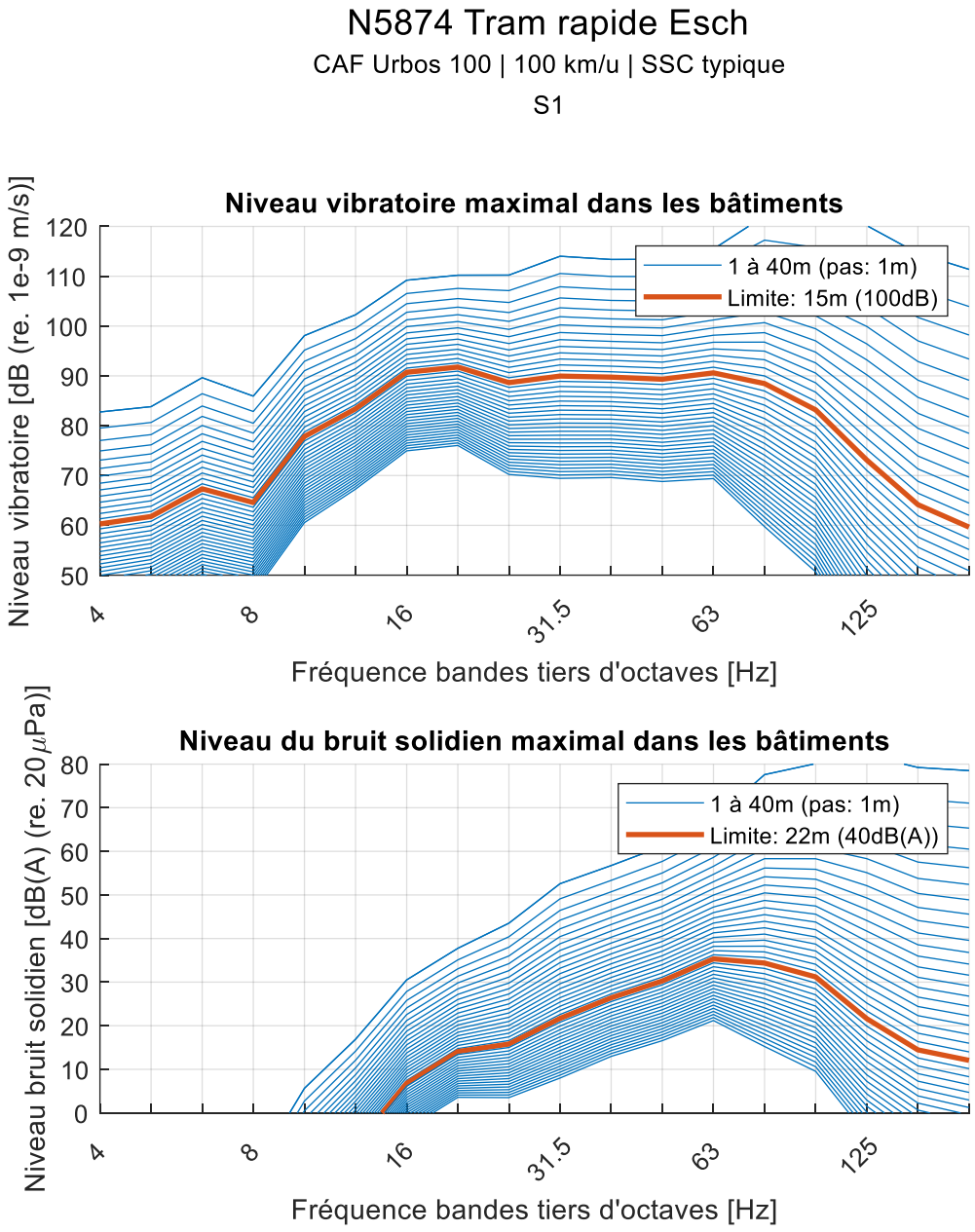


Figure 5.1 Exemple d'un résultat de calcul

- En haut, les infos du calcul ; le projet, le type de tram, la vitesse du tram, les hypothèses considérées, la section de calcul, et le cas échéant, le type de pose antivibratoire.
- Au milieu : les résultats de calcul vibratoires à l'intérieur du bâtiment, pour différentes distances entre la future voie et les bâtiments. La courbe rouge montre la courbe correspondant à la distance minimale entre la voie et le bâtiment afin de respecter le critère vibratoire. La distance correspondante figure dans la légende ainsi que la limite appliquée pour le respect du critère dans la zone concernée.
- En bas : les résultats de calcul acoustiques (bruit structurel) à l'intérieur du bâtiment, pour différentes distances entre la future voie et les bâtiments. La courbe rouge montre la courbe correspondant à la distance minimale entre la voie et le bâtiment afin de respecter le critère du bruit solidien. La distance correspondante figure dans la légende ainsi que la limite appliquée pour le respect du critère dans la zone concernée.

Ces résultats permettent de calculer, pour chaque bâtiment, le niveau vibratoire attendu et le niveau de bruit solidien attendu, à l'intérieur de l'immeuble. Compte tenu du grand nombre de bâtiments considérés, il a été décidé de présenter les résultats visuellement sur la base de la distance minimale entre la voie et les bâtiments afin de respecter les limites.

La détermination de la nature des bâtiments est basée sur les données du « Plan d'aménagement général » (figure 1.1) de la zone concernée.

Pour les zones HAB-1 et HAB-2, les limites pour des bâtiments résidentiels sont considérées ;

- la zone 4 de la norme DIN 4150-2, limite à 100 dB (re.1e-9 m/s) à l'intérieur ;
- le bruit solidien est limité à 40 dB(A) (pour un bâtiment avec une chambre à coucher).

Pour les autres zones, les limites applicables dépendent de la nature du bâtiment. Si des logements y sont prévus, les limites pour des bâtiments résidentiels sont considérées. Sinon, les limites suivantes sont considérées ;

- la zone 3 de la norme DIN 4150-2, limite à 103.5 dB (re.1e-9 m/s) à l'intérieur ;
- le bruit solidien est limité à 45 dB(A).

5.1 VARIANTE « TRACÉ ANTÉRIEUR » RELATIVE À L'ÉTUDE N5874/R04C

- Les résultats de calcul pour une zone 4 sont donnés dans l'annexe B.
- Les résultats de calcul pour une zone 3 sont donnés dans l'annexe C.

Les figures suivantes présentent les évaluations de manière visuelle. Un dépassement se produit lorsque le tampon bleu, ou vert dans le cas d'un appareil de voie, autour des voies dépasse les contours d'un bâtiment.

Les résultats sont basés sur le tracé « version E ». Toutefois, les conclusions restent valables pour la version la plus récente du tracé, « version F » ; par rapport à la version précédente, la voie est légèrement déplacée dans certaines zones, mais dans des endroits où ce déplacement n'a pas d'influence.

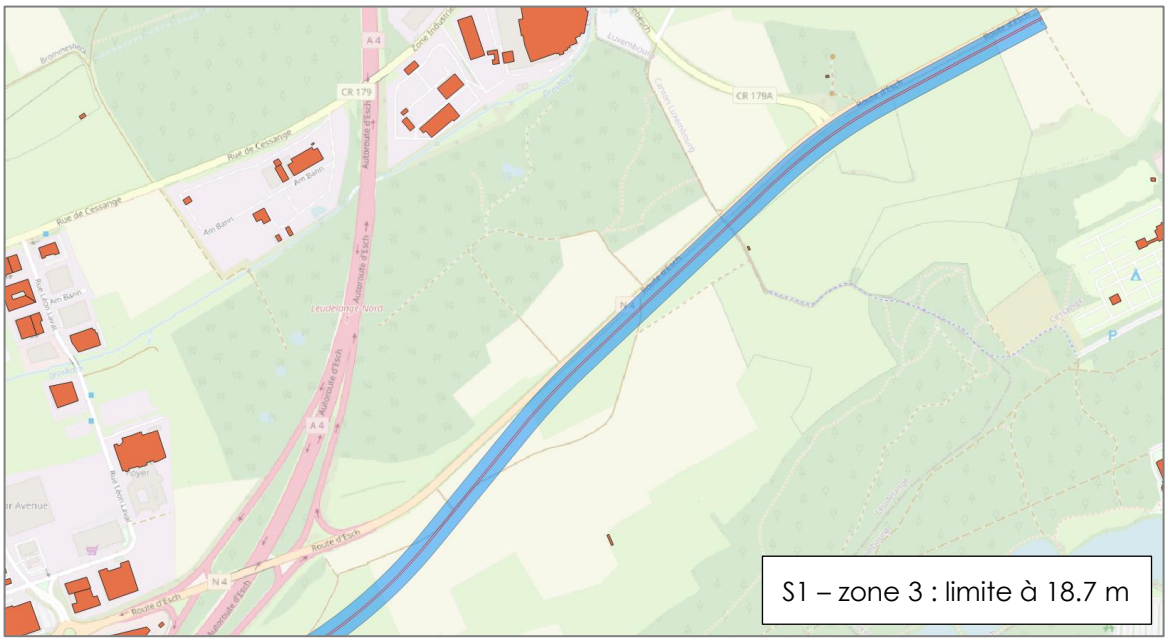


Figure 5.2 Résultats de calcul – Partie 1

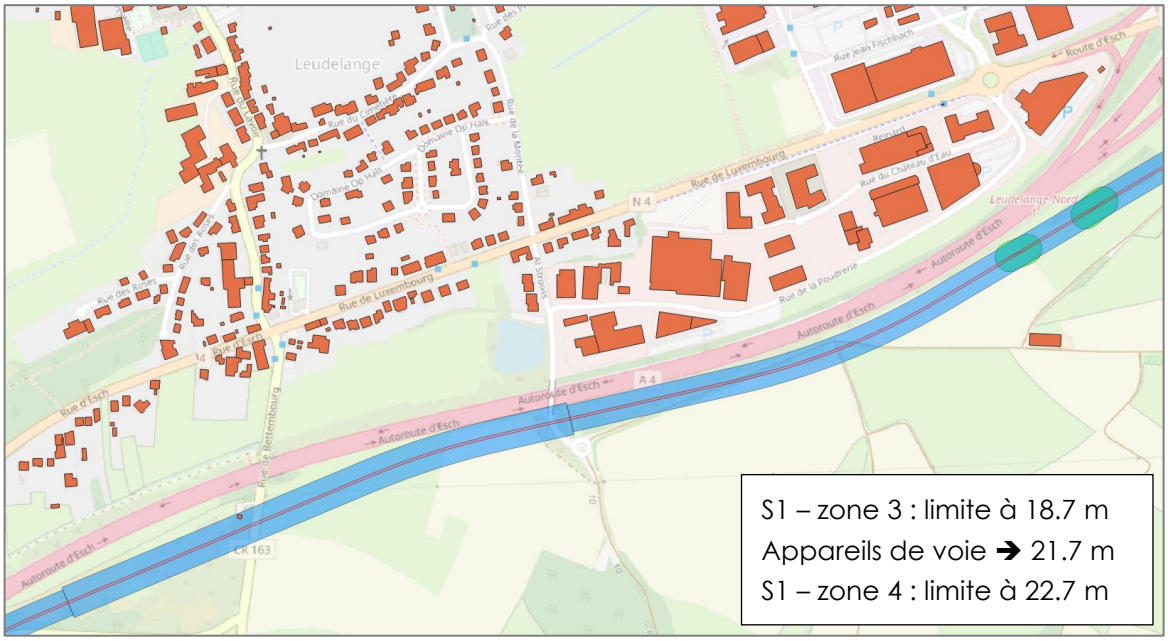


Figure 5.3 Résultats de calcul – Partie 2

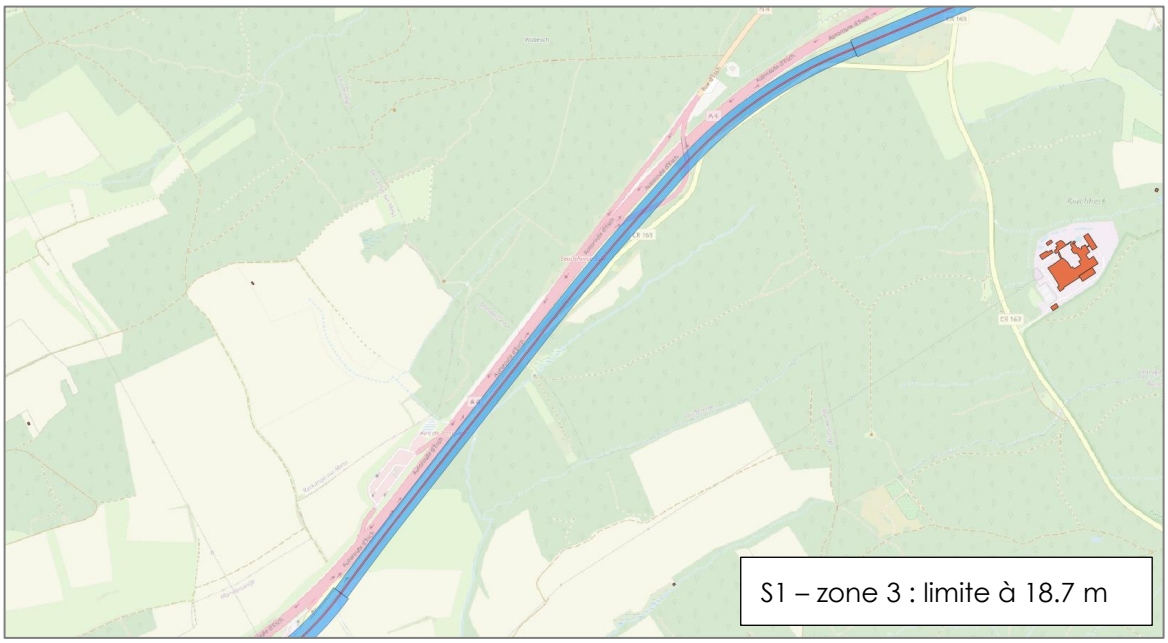


Figure 5.4 Résultats de calcul – Partie 3

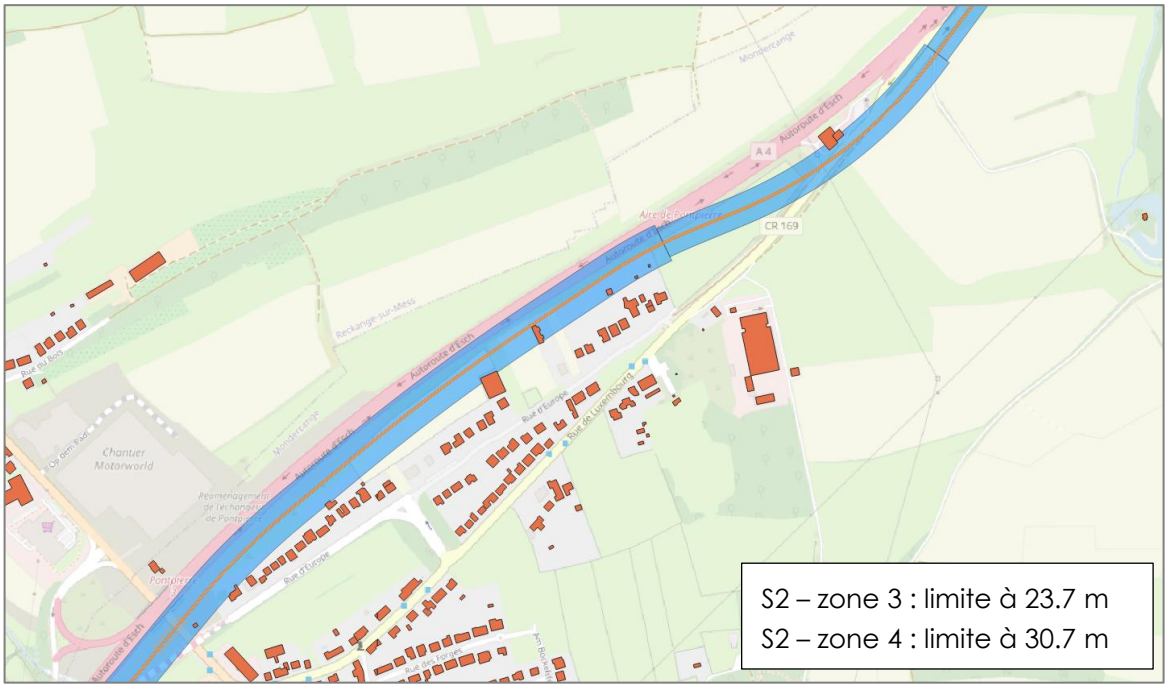


Figure 5.5 Résultats de calcul – Partie 4

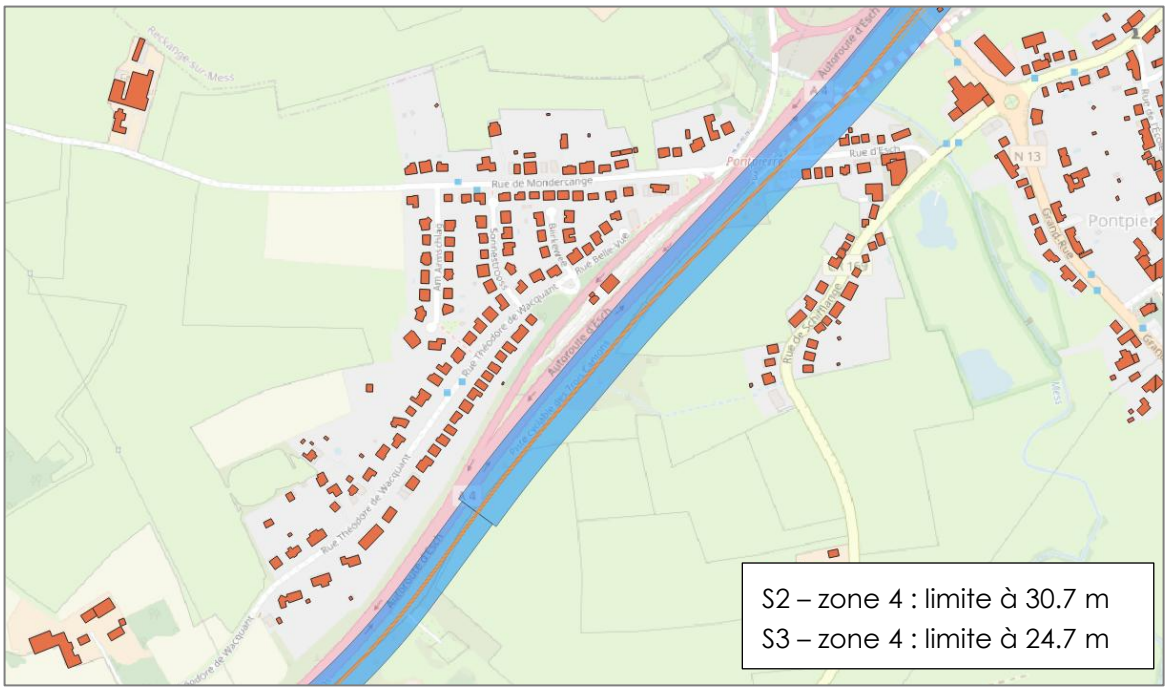


Figure 5.6 Résultats de calcul – Partie 5

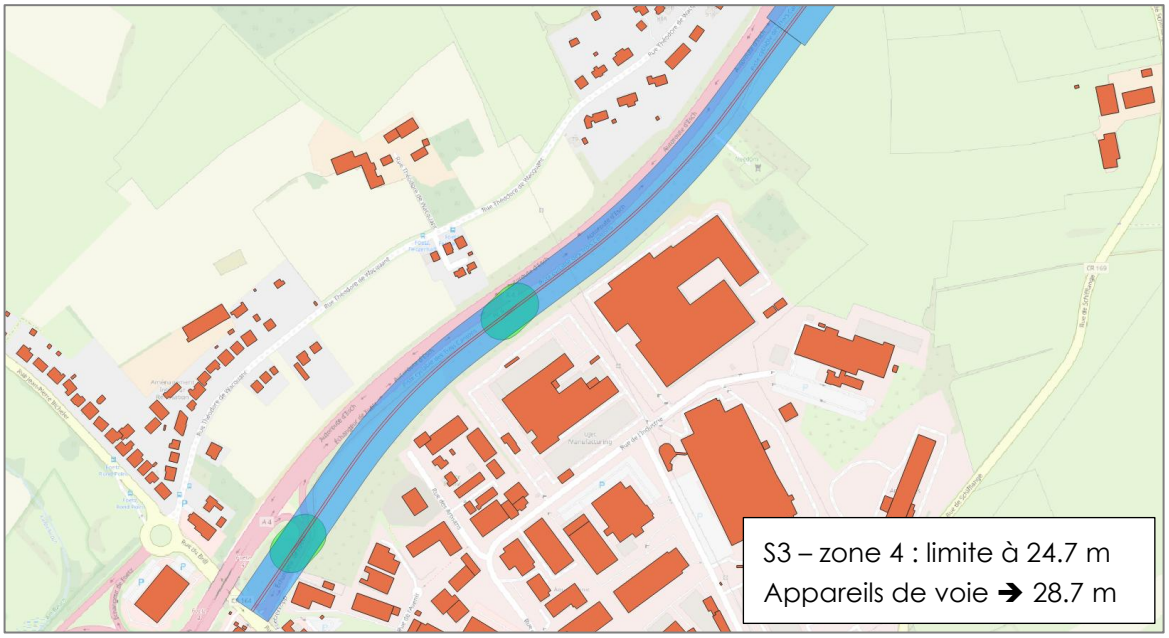


Figure 5.7 Résultats de calcul – Partie 6

5.2 VARIANTE « TRACÉ OPTIMISÉ »

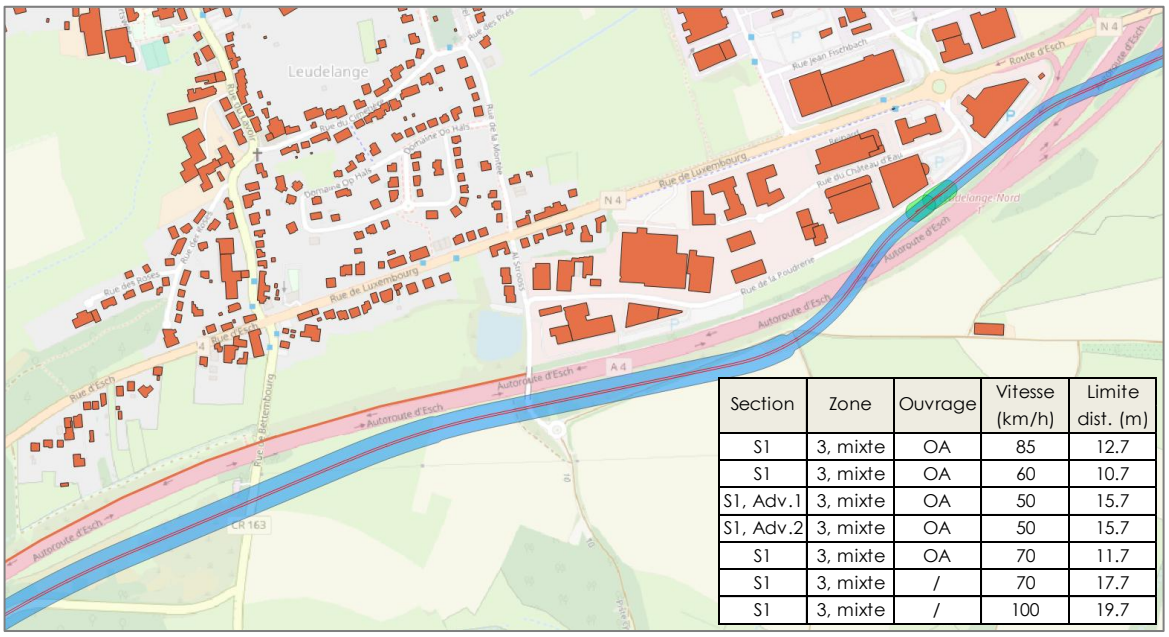
— Les résultats de calcul pour une zone 4 sont donnés dans l'annexe D.
— Les résultats de calcul pour une zone 3 sont donnés dans l'annexe E.

Les figures suivantes présentent les évaluations de manière visuelle. Un dépassement se produit lorsque le tampon bleu, ou vert dans le cas d'un appareil de voie, autour des voies dépasse les contours d'un bâtiment.



Section	Zone	Ouvrage	Vitesse (km/h)	Limite dist. (m)
S1	3, mixte	/	85	18.7
S1	3, mixte	OA	85	12.7

Figure 5.8 Résultats de calcul – Partie 1



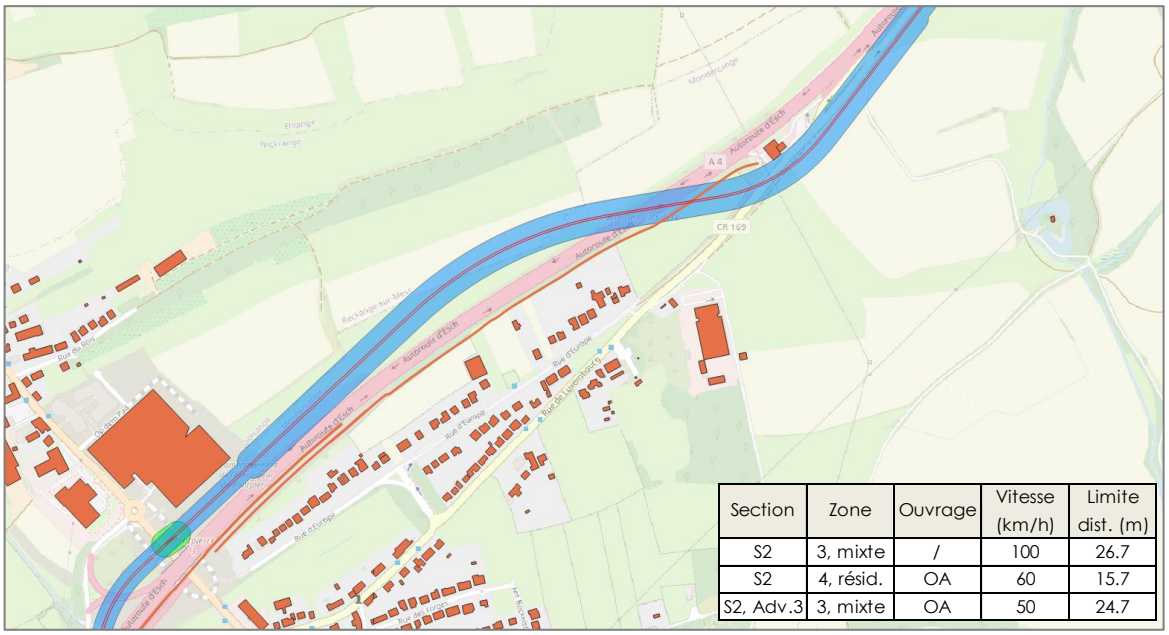
Section	Zone	Ouvrage	Vitesse (km/h)	Limite dist. (m)
S1	3, mixte	OA	85	12.7
S1	3, mixte	OA	60	10.7
S1, Adv.1	3, mixte	OA	50	15.7
S1, Adv.2	3, mixte	OA	50	15.7
S1	3, mixte	OA	70	11.7
S1	3, mixte	/	70	17.7
S1	3, mixte	/	100	19.7

Figure 5.9 Résultats de calcul – Partie 2



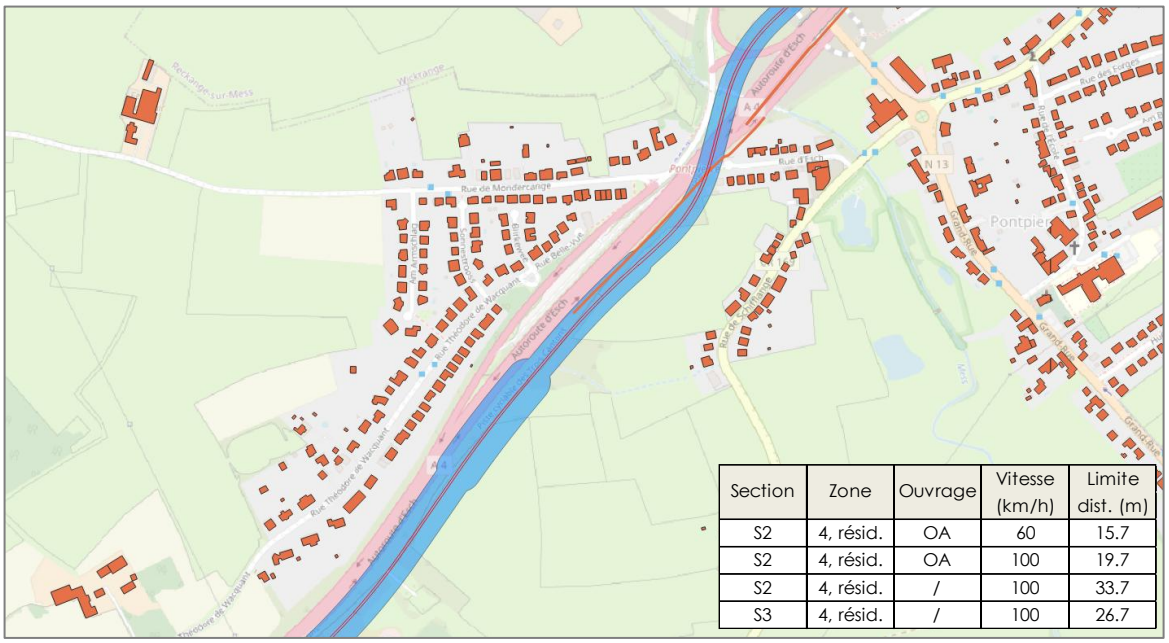
Section	Zone	Ouvrage	Vitesse (km/h)	Limite dist. (m)
S1	3, mixte	/	100	19.7
S2	3, mixte	/	100	26.7

Figure 5.10 Résultats de calcul – Partie 3



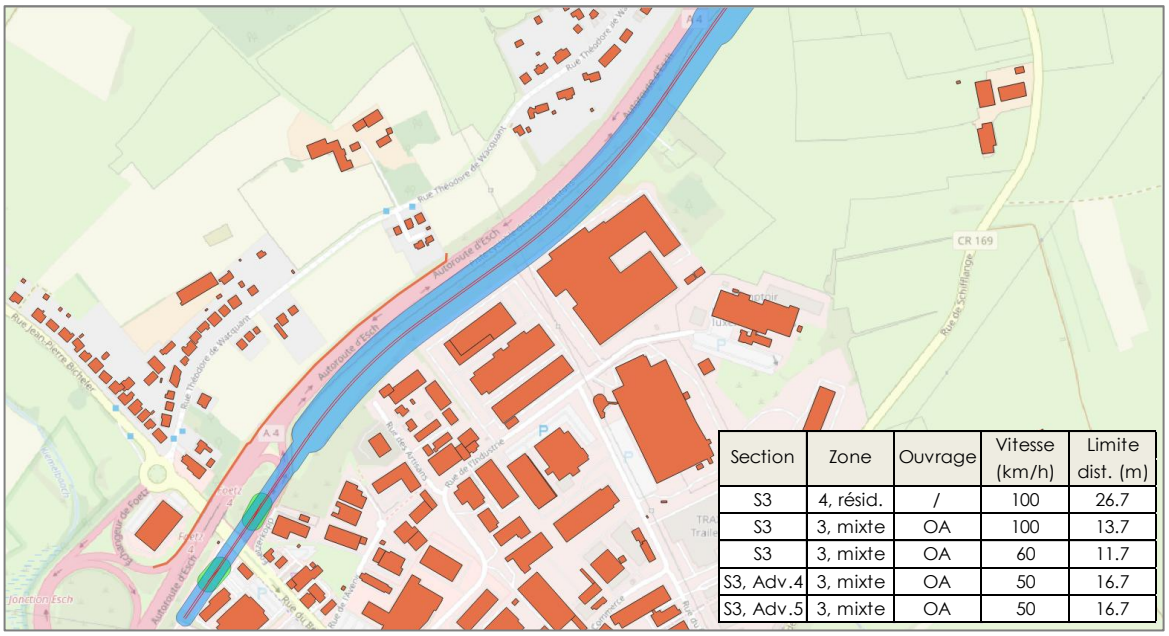
Section	Zone	Ouvrage	Vitesse (km/h)	Limite dist. (m)
S2	3, mixte	/	100	26.7
S2	4, résid.	OA	60	15.7
S2, Adv.3	3, mixte	OA	50	24.7

Figure 5.11 Résultats de calcul – Partie 4



Section	Zone	Ouvrage	Vitesse (km/h)	Limite dist. (m)
S2	4, résid.	OA	60	15.7
S2	4, résid.	OA	100	19.7
S2	4, résid.	/	100	33.7
S3	4, résid.	/	100	26.7

Figure 5.12 Résultats de calcul – Partie 5



Section	Zone	Ouvrage	Vitesse (km/h)	Limite dist. (m)
S3	4, résid.	/	100	26.7
S3	3, mixte	OA	100	13.7
S3	3, mixte	OA	60	11.7
S3, Adv.4	3, mixte	OA	50	16.7
S3, Adv.5	3, mixte	OA	50	16.7

Figure 5.13 Résultats de calcul – Partie 6

5.3 MESURES DE MITIGATION

5.3.1 Variante « Tracé antérieur » relative à l'étude N5874/R04C

Dans plusieurs bâtiments, des dépassements des limites sont attendus. Le critère le plus strict est celui du bruit solidien :

— Plusieurs dépassements se produisent dans des bâtiments non pertinents, comme des cabanes (e.g. figure 5.14). Les bâtiments encerclés en vert sont des cabanes, pour lesquelles les critères ne s'appliquent pas. Le bâtiment encerclé en bleu est un hangar, dans lequel des activités industrielles sont effectuées et les critères ne s'appliquent donc pas.

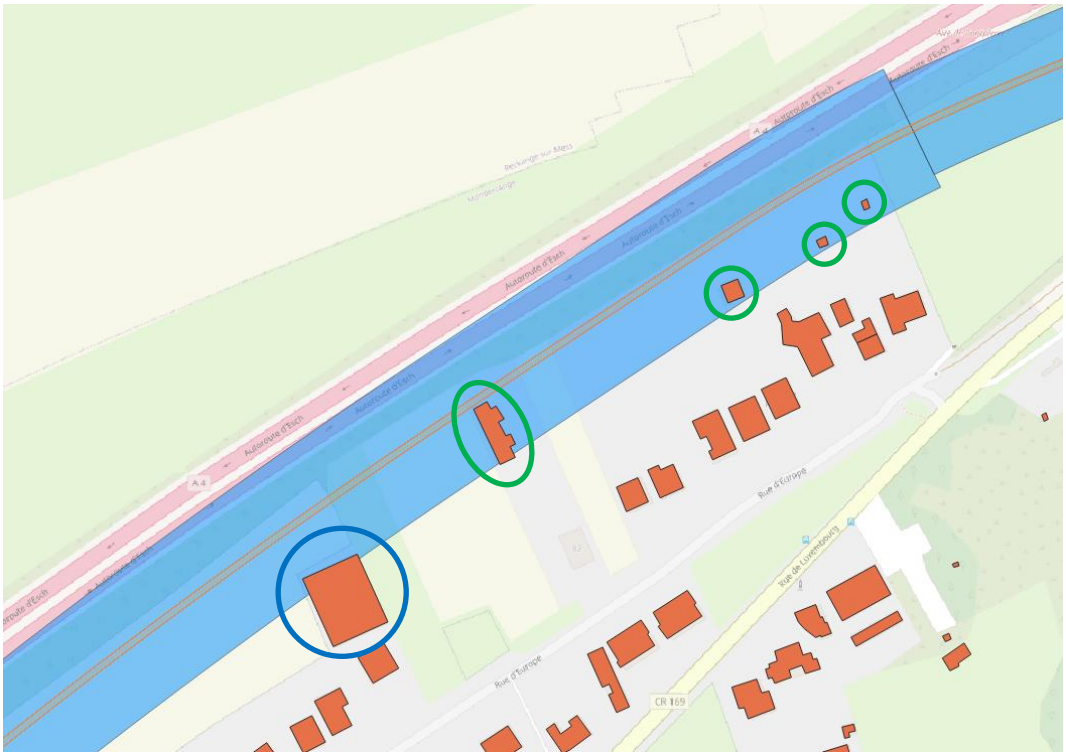


Figure 5.14 Constructions dans la zone de tampon

— Au niveau de la station de service, des limites strictes pour un logement ne sont pas d'application. Toutefois, pour éviter des nuisances potentielles, il est recommandé de prévoir un système « - 8 dB » entre le PM 6275 et 6360.
— Les réels dépassements se produisent principalement à Pontpierre, dans la rue d'Esch, dans 2 bâtiments. Les dépassements sont attendus juste avant et après la station, où la vitesse du tram risque d'être déjà plus importante. Il est recommandé de prévoir un système « - 8 dB » entre les PM's 7530 et 7600 et entre 7860 et 7975. Pour les bâtiments encerclés en vert (cf. figure 5.15), cela permet d'éviter des dépassements.

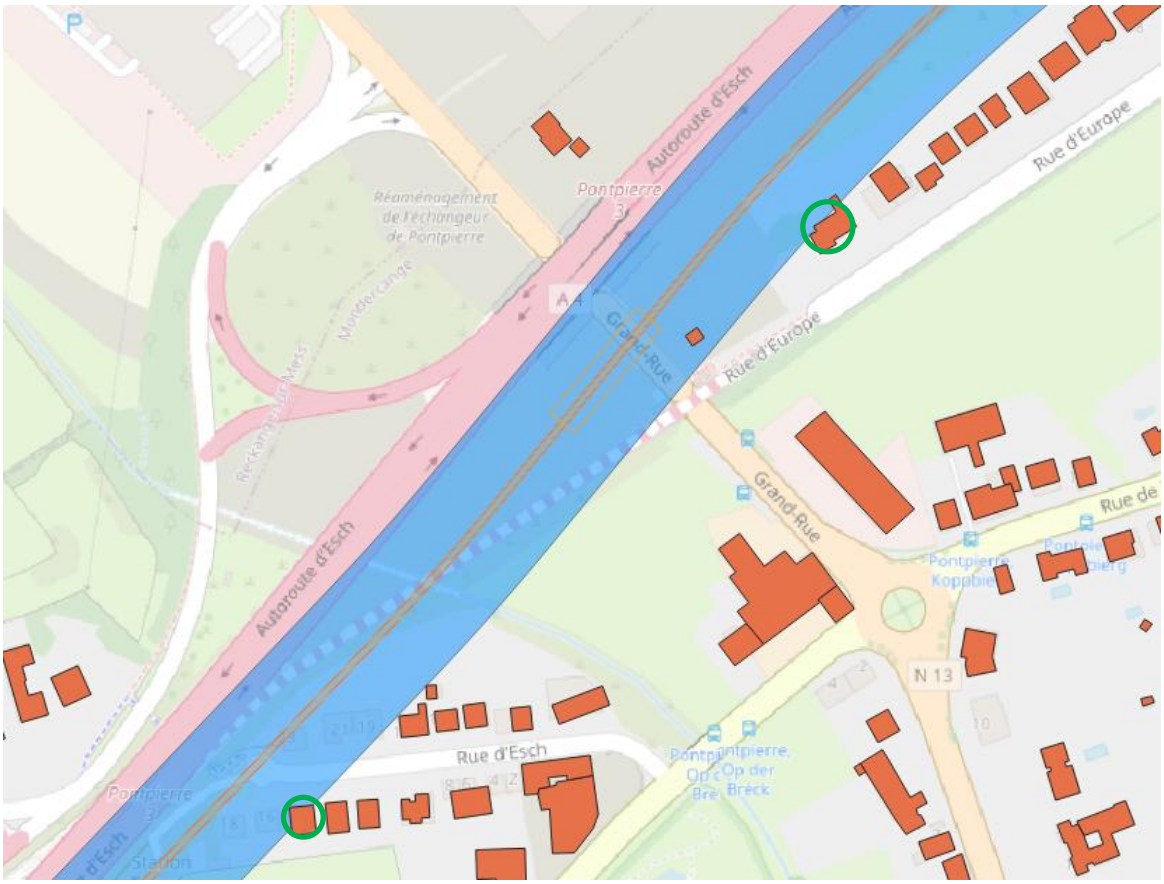


Figure 5.15 Constructions dans la zone de tampon à Pontpierre

Les emplacements exacts des systèmes de mitigation « - 8 dB » sont donnés dans les figures suivantes :

— de PM 6275 à 6360 (figure 5.16) ;
— de PM 7530 à 7600 (figure 5.17) ;
— de PM 7860 à 7975 (figure 5.18).

Le tableau 5.1 montre les valeurs résiduelles calculées avec le système « - 8 dB » au niveau de ces endroits. À titre de comparaison, les valeurs calculées pour une voie classique et les valeurs limites sont également données.

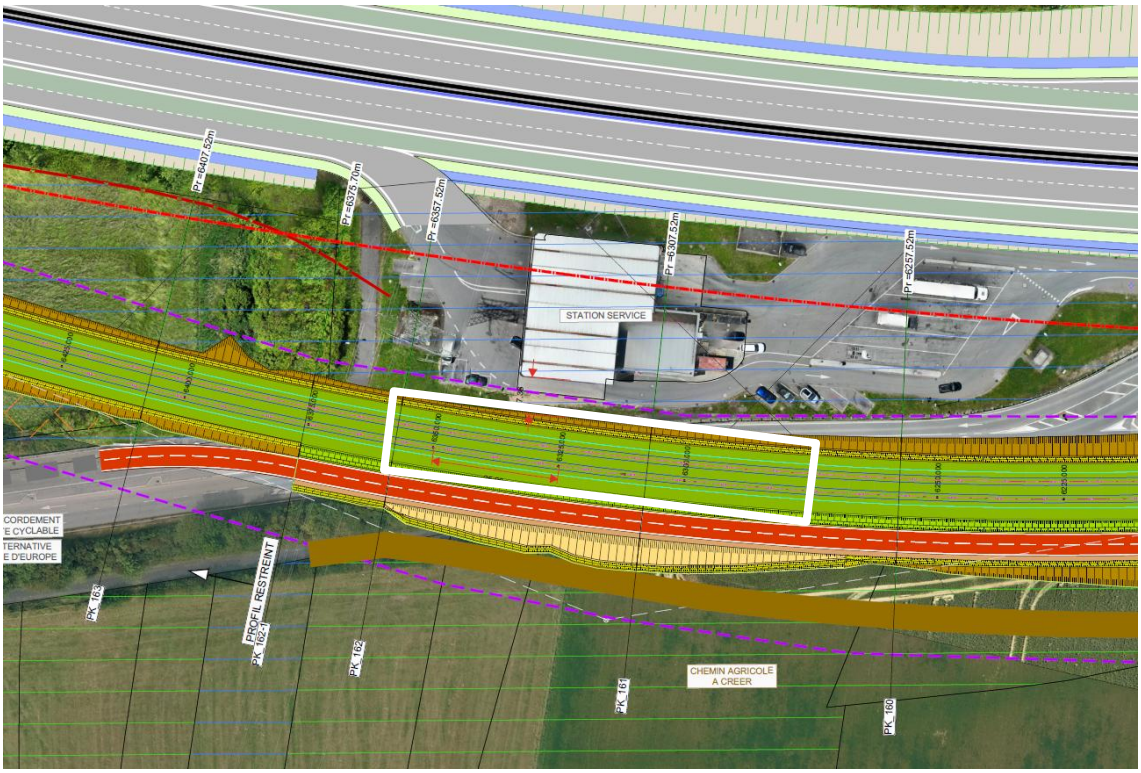


Figure 5.16 Pontpierre – station de service : de PM 6275 à PM 6360, système « - 8 dB »

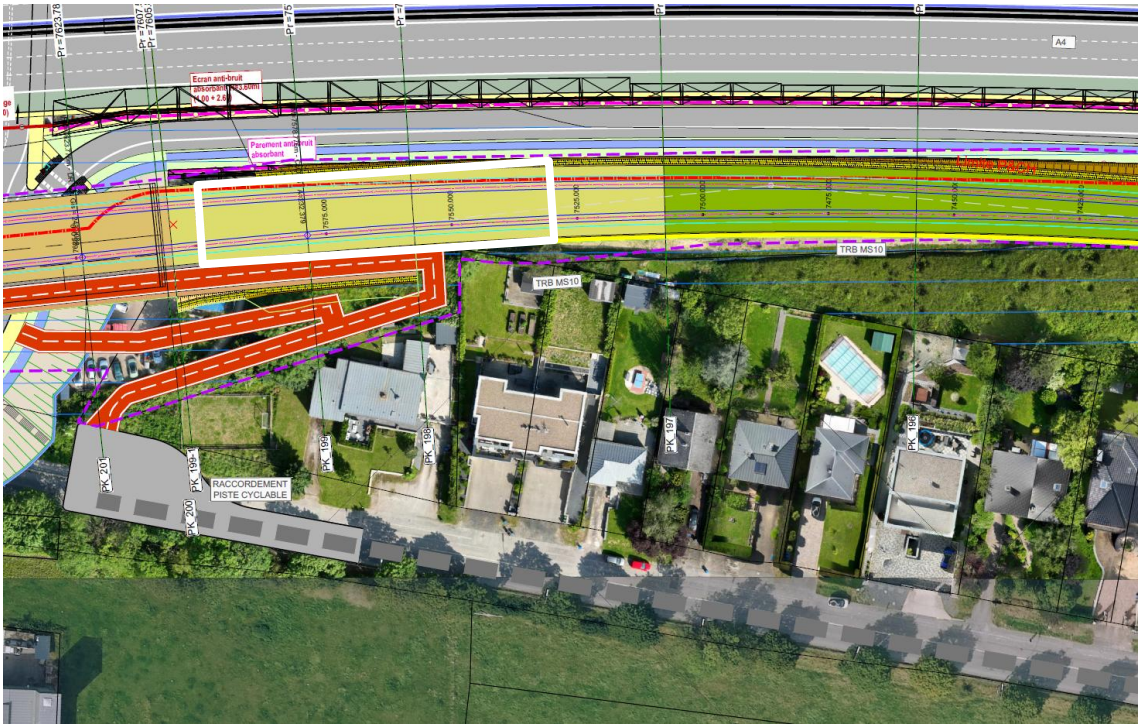


Figure 5.17 Pontpierre – rue de l'Europe : de PM 7530 à PM 7600, système « - 8 dB »



Figure 5.18 Pontpierre – rue d'Esch : de PM 7860 à PM 7975, système « - 8 dB »

	Vibrations à l'intérieur [dB (re.1e-9m/s)]			Bruit solidien [dB(A)]		
	Pose classique	Système « - 8 dB »	Limites zones 3, 4	Pose classique	Système « - 8 dB »	Limites zones 3, 4
PM 6275 à PM 6360	102.5	102.5	103.5	55.5	47.7	45
PM 7530 à PM 7600	90.2	90.6	100	42.3	34.7	40
PM 7860 à PM 7975	92.0	92.3	100	44.2	36.6	40

Tableau 5.1 Valeurs résiduelles

5.3.2 Variante « Tracé optimisé »

Dans un bâtiment, des dépassements des limites sont attendus. Le critère le plus strict est celui du bruit solidien.

Au niveau de la station-service de Pontpierre (figure 5.19), la distance minimale n'est pas tout à fait respectée à une vitesse de 100 km/h. Cependant, le profil de vitesse détaillé montre clairement qu'une vitesse de 70 km/h s'applique à cet endroit (de PM 6350 à PM 6650). À cette vitesse, la distance minimale est respectée ; il n'est donc pas jugé nécessaire de mettre en place des systèmes antivibratoires.

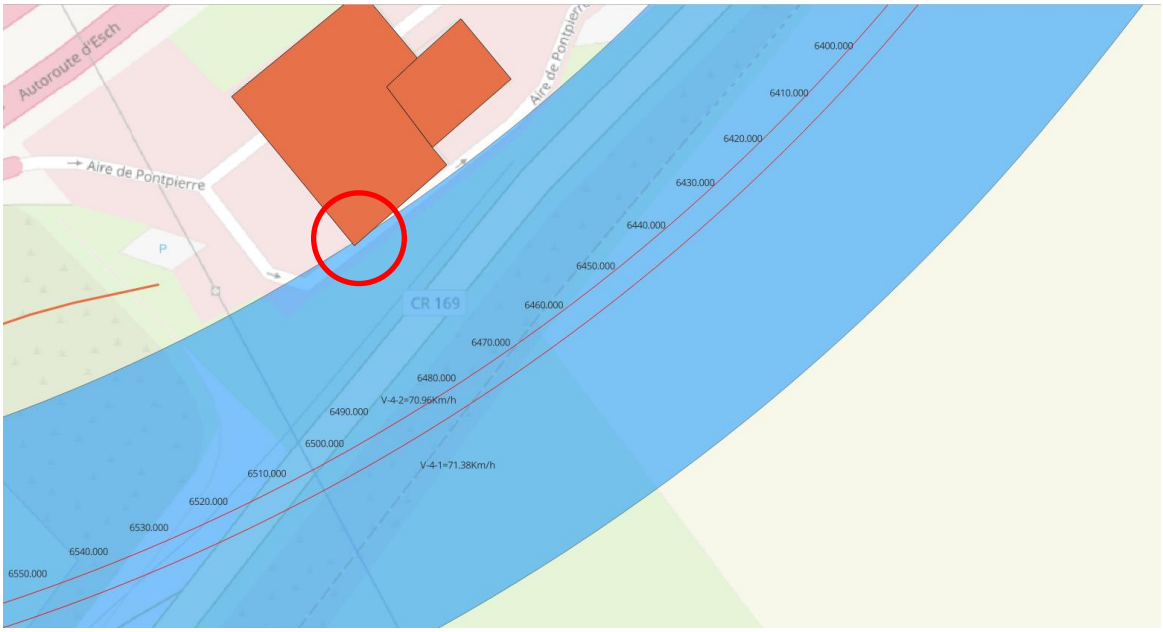


Figure 5.19 Pontpierre – Station de service : PM 6480 (zone 3, vitesse 100 km/h)

Aucun dépassement des critères vibratoires n'est prévu ailleurs sur l'ensemble du tracé du tramway. Étant donné que ce seul dépassement mentionné ne se produira pas, aucun système antivibratoire n'est donc nécessaire sur l'ensemble du tracé de la ligne de tramway.

5.4 EFFETS CUMULATIFS VARIANTE « TRACÉ OPTIMISÉ » – CORRIDOR MULTIMODAL

Le réaménagement du corridor multimodal consiste en un élargissement de l'autoroute sur 3 voies. Des effets cumulatifs ne peuvent pas être exclus a priori. Toutefois, pour les raisons suivantes, des effets cumulatifs ne sont pas attendus ;

- Généralement, le trafic routier est nettement moins impactant du point de vue vibratoire que le trafic ferroviaire. Les passages du trafic routier, et principalement des poids lourds, peuvent causer des nuisances vibratoires à courte distance de la route. L'impact est aggravé quand la route est dégradée ou constituée de modules, séparés par des joints transversaux. Pour une nouvelle autoroute, on n'attend pas de facteurs aggravants.
- Le faible impact du trafic routier est confirmé par les mesures de l'état actuel, qui ont montré des niveaux vibratoires faibles. Les passages des trams sont généralement plus impactants. Du côté sud, la voie tramway sur le viaduc se trouve plus proche des bâtiments avoisinants (16, rue d'Esch) que l'autoroute. La masse importante et la rigidité de l'ouvrage modifient la propagation dynamique des vibrations et créent un effet d'atténuation entre la structure et le terrain adjacent. L'impact de la voie tramway sera généralement inférieur par rapport à une infrastructure directement en contact avec le sol. Un effet vibratoire de l'autoroute n'est pas attendu, vu la distance importante entre les bâtiments et l'autoroute. Du côté nord de l'autoroute, les calculs

ont montré qu'un impact vibratoire de la voie tramway n'est pas attendu. Dans les deux cas, il n'y a donc pas d'effets cumulatifs.

Il y a lieu de noter que ce réaménagement peut également provoquer des modifications de la transmission vibratoire. Pour cette raison, les mesures de transmissibilité sont effectuées du côté sud de l'autoroute, où sera construit le tramway après avoir traversé l'autoroute en revenant du côté nord. La transmission vibratoire entre les voies du tram et les bâtiments du côté sud, lesquels se trouvent nettement plus proches des voies que les bâtiments situés au nord de l'autoroute, ne sera pas impactée par le réaménagement de l'autoroute.

6 PHASE CHANTIER

Ce chapitre concerne la phase chantier de ce projet ; les incidences vibratoires des procédés de travail seront qualifiées.

6.1 MÉTHODOLOGIE

La méthodologie appliquée est une méthodologie simplifiée par rapport à celle pour la phase d'exploitation. La raison en est que le degré de détail des données d'entrée pour les calculs de la phase chantier est inférieur à celui pour la phase d'exploitation. La source vibratoire des différents engins est connue, mais pas le contenu fréquentiel. L'utilisation d'une transmission vibratoire, qui tient compte du contenu fréquentiel, n'est par conséquent pas possible.

La méthodologie de calcul suit la norme DIN 4150-1 (1999) : « *Vibrations dans les bâtiments : 1. Prévision des paramètres vibratoires* ». Cette méthodologie est régulièrement appliquée dans le cadre des calculs pour une phase chantier.

Propagation des ondes

$$V = V_1 \left(\frac{R_1}{R}\right)^n \exp[-\alpha(R - R_1)]$$

avec $\alpha = \frac{2\pi D}{A}$ (amortissement du sol) et

n coefficient fonction du type de source, d'excitation et d'ondes

Pour tous les travaux de démolition et d'excavation, on peut considérer des sources de type impulsionnel. Même les forages et les perforatrices sont à considérer comme des sources impulsionnelles et ponctuelles.

Pour les transmissions dans le sol, il faut distinguer :

- les travaux dans les premières couches de terrain (fort irrégulier) : ondes surfaciques ;
- les travaux à plus grande profondeur dans des couches de roche très homogènes (à partir de 10 m) : ondes volumiques (demi-sphère).

Ceci conduit aux valeurs suivantes pour le paramètre n :

- n = 1.0 (source impulsionnelle, source ponctuelle, ondes surfaciques) ;
- n = 1.5 (source impulsionnelle, source ponctuelle, ondes volumiques).

Dans une approche conservatrice, un coefficient de (n = 1.00) est utilisé pour la transmission vibratoire dans les terrains rocheux.

Aussi, concernant l'amortissement du sol rocheux, on prend une valeur plutôt conservatrice :

- α = 0.025 (f : 60 Hz ; υ_s = 1 500 m/s)

L'annexe F présente un tableau avec le taux d'affaiblissement vibratoire sur la base des paramètres décrits ci-dessus.

Couplage sol / structure

L'effet du récepteur, le couplage sol / structure et l'amplification structurelle, est décrit dans le chapitre 4.3. Comme le contenu fréquentiel de la source n'est pas connu, les courbes citées ne peuvent pas être utilisées directement.

Dans une approche conservatrice, on peut supposer une réduction du couplage sol / structure égale à l'amplification des vibrations des dalles.

6.2 CRITÈRES

La norme DIN 4150 (« *Vibrations dans les bâtiments* ») donne des niveaux vibratoires limites pour :

- partie 2 : effets sur des personnes dans les bâtiments ;
- partie 3 : effets sur les constructions.

La norme DIN 4150 préconise :

- DIN 4150-3 : niveau limite pour constructions moyennes classe 2 :
  - 1-10 Hz : 5 mm/s en vitesse vibratoire ;
  - 10-50 Hz ; 5-15 mm/s en vitesse vibratoire ;
  - 50-100 Hz ; 15-20 mm/s en vitesse vibratoire ;
- DIN 4150-3 : niveau limite pour constructions plus sensibles classe 3 :
  - 1-10 Hz : 3 mm/s en vitesse vibratoire ;
  - 10-50 Hz ; 3-8 mm/s en vitesse vibratoire ;
  - 50-100 Hz ; 8-10 mm/s en vitesse vibratoire ;
- DIN 4150-2 : niveau pour le confort des personnes :

$$KB_{Fmax} \leq A_u$$

sinon

$$KB_{Fmax} \leq A_o \; et \; KB_{Ftr} \leq A_r$$

Pour des zones d'habitations, les valeurs limites sont :

- $A_U \leq 0.15$
- $A_o \leq 3$
- $A_r \leq 0.07$

En plus, pour des travaux de construction, pour lesquels les jours de vraie gêne (valeurs au-dessus de la valeur A_U) sont inférieurs à 78 jours, des niveaux plus élevés sont acceptables (§ 6.5.4 de cette norme et tableau 2).

Remarque : $A_U \leq 0.60 = \approx 1$ mm/s.

Ensemble avec une action d'information des habitants (*) « Stufe II », ces limites deviennent :

	6j < D ≤ 26j	26j < D ≤ 78j
A_U	0.80	0.60
A_o	5	5
A_r	0.60	0.40

Tableau 6.1

(*) L'information à fournir aux habitants consiste en :

- Information aux habitants, concernant le type de travaux, la durée et la possibilité de vibration
- Information sur la nécessité des travaux et l'inévitabilité des vibrations
- Prendre en considération des souhaits des habitants sur la durée, des périodes de repos et autres mesures pour réduire les nuisances
- Designer une personne de contact auprès de l'entrepreneur
- Explication d'absence de danger structurel pour leur logement

Critère

Dans un souhait de confort vibratoire pour les riverains ainsi qu'une sécurité vers la construction adjacente, **un critère de 1 mm/s** ($A_U \approx 0.6$) maximum sera recherché. Si ce niveau serait dépassé, un calcul plus détaillé du niveau A_r suivant la norme DIN 4150-2, § 6.5.4, sera réalisé.

6.3 SOURCES

Les puissances vibratoires des différents engins qui seront utilisées dans les calculs sont reprises des documents suivants :

- littérature LIT ;
- mesure sur sites MES ;
- documentation fournisseur DOC.

situation	origine	distance [m]	niveau de vitesse vibratoire [mm/s]
camion sur sol	MES	7.5	0.25
pelle mécanique (chargement camions)	LIT	7.5	0.50
pelle hydraulique 300 kW	LIT	7.5	0.8
bulldozer	MES	7.5	0.8

situation	origine	distance [m]	niveau de vitesse vibratoire [mm/s]
ripper/godet	LIT	7.5	1.0
foreuses rotatives f (diamètre)	LIT	7.5	0.5 - 1.5
éclateur de roches hydraulique (DARDA)	DOC	7.5	1.5
fraiseuse f (type)	MES	7.5	1.0 - 5.0
marteau hydraulique / montalbert	MES	7.5	2.5
brise-roche	LIT	7.5	5.0
explosifs 0.5 kg TNT	LIT	7.5	25.0

Tableau 6.2

6.4 PHASAGE

Les travaux de construction consistent en trois aspects suivants ;

- la réalisation des voies ;
- la construction des ouvrages d'art, y compris les viaducs
- la construction des sous-stations de traction.

Les étapes de construction dépendent de quel type de chantier il s'agit (voies, ouvrages d'art ou sous-stations). Le phasage détaillé sera présenté dans le chapitre 6.6.

6.5 RÉCEPTEURS

Les récepteurs sont les mêmes que pour l'étude de la phase d'exploitation. Comme pour la phase d'exploitation, l'analyse est basée sur le calcul d'une « distance de sécurité » ; tant que les travaux sont effectués à une distance supérieure à cette distance de sécurité, il n'y a pas de risque de dépassements des critères.

6.6 BILAN DES DIFFÉRENTS IMPACTS

Des actions d'isolation de base sont imposées dans le projet. Afin de minimiser les impacts acoustiques, le Maître d'Ouvrage est demandé d'intégrer les actions suivantes dans son projet :

- Travaux de jour : 07h00 – 19h00.
- Imposition d'utiliser des engins de démolition et d'excavation présentant des émissions conformes aux normes CEE et aux valeurs annoncées dans la présente étude ; des fiches techniques des engins seront à fournir préalablement à leur utilisation sur le chantier (niveaux vibratoires).

6.6.1 Réalisation des voies

Les étapes suivantes sont considérées ;

- Étape 1.1 ; Terrassement pour les coffres de chaussées et des voies
- Étape 1.2 ; Travaux de pose des voies
- Étape 1.3 ; Travaux de forage de micropieux
- Étape 1.4 ; Travaux de montage des mâts pour la ligne aérienne de contact
- Étape 1.5 ; Travaux de pose des multitubulaires tram

Sur la base de ces étapes, les scénarios suivants sont définis ;

- Scénario 1.1.1 ; Terrassement superficiel (terres meubles), en utilisant une pelle
- Scénario 1.1.2 ; Terrassement dans la roche, en utilisant un brise-roche
- Scénario 1.2 ; Travaux de forage de micropieux
- Scénario 1.3 ; Travaux de bétonnage et d'aménagement général : ce scénario comprend les étapes sans engins spécifiques avec un impact vibratoire important. On assume l'utilisation d'une grue et des camions.

6.6.1.1 Scénario 1.1.1 – terrassement superficiel

Ce scénario comprend des travaux de terrassement superficiel ; les premières couches de sol, qui ne nécessitent pas d'engins spécifiques comme un ripper ou un brise-roche.

Étapes correspondantes

- Étape 1.1 ; Terrassement pour les coffres de chaussées et des voies

Travaux

- Excavation et terrassement des couches de sol superficielles, à l'aide d'une pelle hydraulique
- Cette étape ne convient pas pour des sols de type 6 ou 7.
- Enlèvement du sol à l'aide de camions

Sources

- Pelle hydraulique
- Camions

Niveaux vibratoires

- Source dominante : pelle hydraulique
- Propagation
    - Source ponctuelle
    - Propagation surfacique

Source	Travaux	L_v à 7.5 m [mm/s]	Distance de sécurité [m]
Pelle hydraulique	Terrassement	0.8	6

Tableau 6.3

Discussion

La distance entre le chantier et les bâtiments est partout nettement supérieure à 6 m. Des dépassements ne sont pas attendus.

6.6.1.2 Scénario 1.1.2 – terrassement dans la roche

Ce scénario comprend des travaux de terrassement dans les couches de type 7, ce qui nécessite des engins spécifiques comme un brise-roche.

Étapes correspondantes

— Étape 1.1 ; Terrassement pour les coffres de chaussées et des voies

Travaux

— Excavation et terrassement des couches de sol type 7, à l'aide d'une pelle hydraulique munie d'un brise-roche, ou comme alternative une fraise de petite taille
— Enlèvement du sol à l'aide de camions

Sources

— Pelle hydraulique munie d'un brise-roche
— Camions

Niveaux vibratoires

— Source dominante : brise-roche, alternative ; fraise de petite taille
— Propagation
    — Source ponctuelle
    — Propagation moyenne

Source	Travaux	L_v à 7.5 m [mm/s]	Distance de sécurité [m]
Brise-roche	Excavation	5	25
Fraise de petite taille	Excavation	1.5	10

Tableau 6.4

Discussion

Au niveau de la station de service à Pontpierre (cf. figure 6.1), la distance entre le chantier et les bâtiments est juste environ 25 m. De très légers dépassements occasionnels de la limite sont possibles, mais la gêne sera vraisemblablement très limitée. Additionnellement, il s'agit d'un bâtiment commercial et des mesures de mitigation ne sont pas proposées.

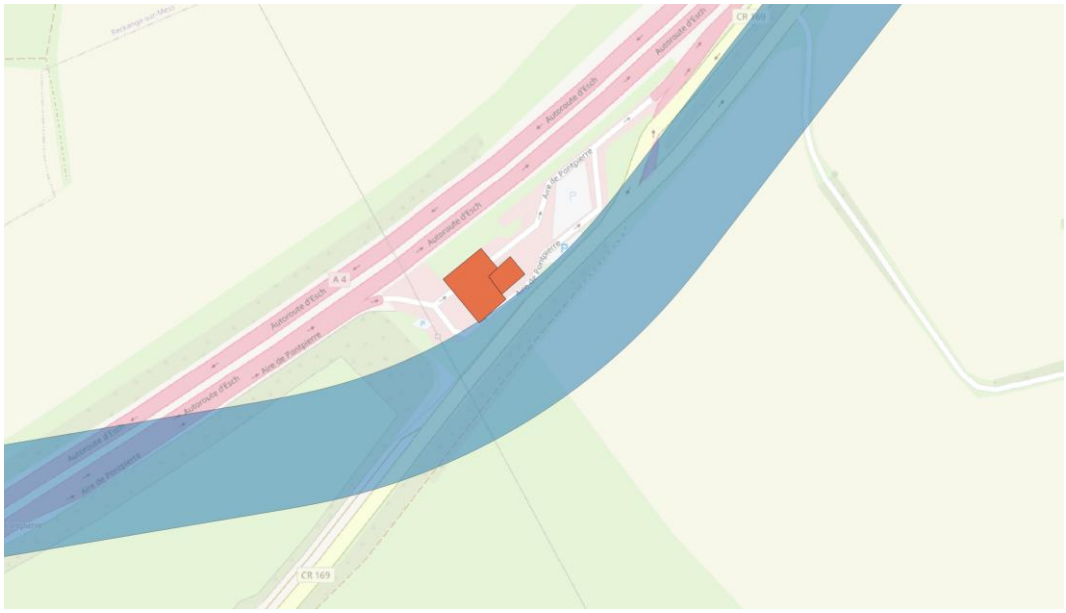


Figure 6.1 Situation Pontpierre – station de service en rouge

Dans les autres bâtiments le long du tracé, la distance est supérieure à 25 m et des dépassements ne sont pas attendus.

6.6.1.3 Scénario 1.2 – forage des micropieux

Forage des micropieux pour le montage des mâts de la ligne aérienne de contact

Étapes correspondantes

— Étape 1.3 ; Travaux de forage de micropieux

Travaux

— Forage des micropieux

Niveaux vibratoires

— Source dominante : foreuse
— Propagation
  — Source ponctuelle
  — Propagation volumique

Source	Travaux	L_v à 7.5 m [mm/s]	Distance de sécurité [m]
Foreuse	Forage des micropieux	1	7.5

Tableau 6.5

Discussion

La distance entre les bâtiments et les mâts pour la LAC est partout supérieure à 7.5 m. Des dépassements ne sont pas attendus.

6.6.1.4 Scénario 1.3 – travaux de bétonnage et d'aménagement général

Ce scénario comprend les étapes sans engins spécifiques avec un impact vibratoire important. On assume l'utilisation d'une grue et des camions.

Étapes correspondantes

- Étape 1.2 ; Travaux de pose des voies
- Étape 1.4 ; Travaux de montage des mâts pour la ligne aérienne de contact
- Étape 1.5 ; Travaux de pose des multitubulaires tram

Travaux

- Pose des voies, des réseaux, … finitions des routes et des trottoirs, … toutes sortes de travaux d'aménagement général nécessitant des engins comme une grue et des camions

Sources

- Grue
- Camions

Niveaux vibratoires

Généralement, ces activités ne provoquent pas de niveaux vibratoires importants.

Discussion

Pas de dépassements.

6.6.2 La construction des ouvrages d'art

Les ouvrages suivants sont considérés ;

- OA1530 : Passerelle
- OA1531 : Viaduc tramway
- OA1532 : Viaduc tramway

- OA1533 : Passerelle
- OA1534 : Pont-rail
- OA1535 : Trémie tram
- OA1537 : Pont-rail
- OA1538 : Trémie tram
- OA1541 : Viaduc tram
- OA1542 : Viaduc tram

La figure 6.2 montre la localisation des ouvrages d'art.

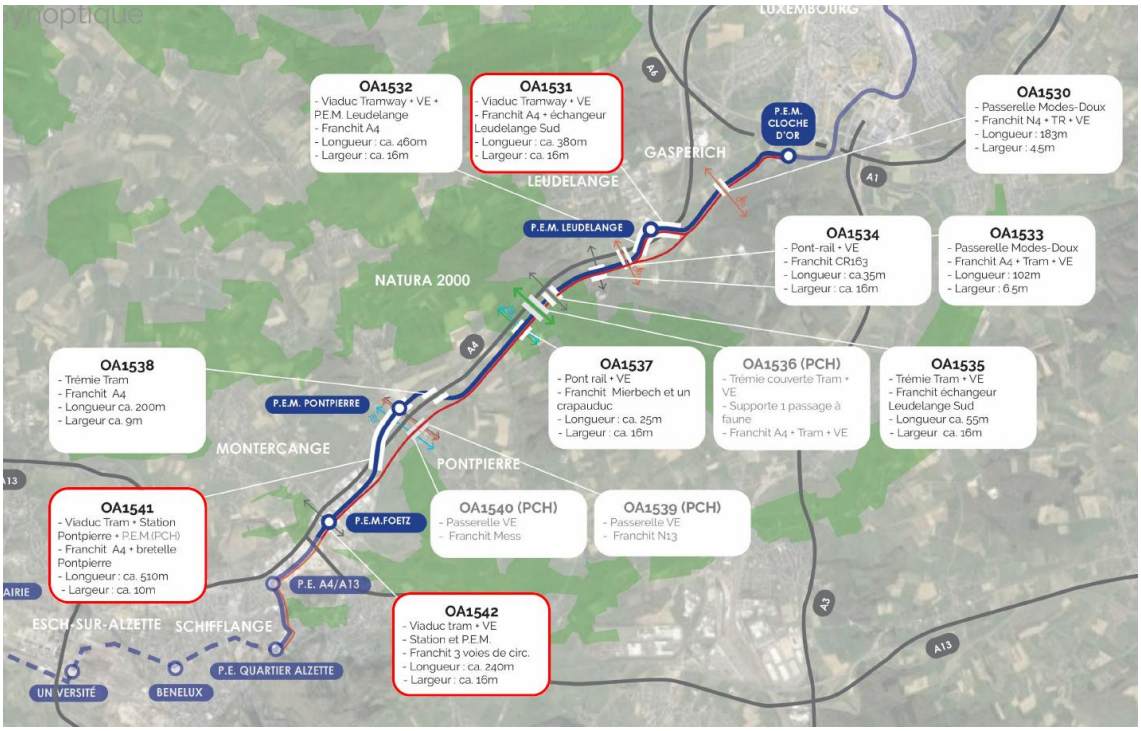


Figure 6.2 Localisation des ouvrages d'art

6.6.2.1 OA1530 – Passerelle

La distance entre cet ouvrage d'art et des points récepteurs est de plus de 200 m. Aucun impact n'est attendu.

6.6.2.2 OA1531-OA1532 – Viaduc tramway Leudelange

Les phases suivantes sont considérées ;

- Installation chantier et plateforme de travail
- Pieux, poutres de fondation et dalles flottantes
- Piles
- Montage et assemblage structure métallique
- Talutage

Sur la base de ce phasage, les scénarios suivants sont définis ;

- Scénario 2.1.1 ; Terrassement superficiel (terres meubles), en utilisant une pelle
- Scénario 2.1.2 ; Terrassement dans la roche, en utilisant un brise-roche
- Scénario 2.1.3 ; Travaux de forage des pieux de fondation
- Scénario 2.1.4 ; Montage des viaducs

Scénario 2.1.1 – terrassement superficiel

Ce scénario comprend des travaux de terrassement superficiel ; les premières couches de sol, qui ne nécessitent pas d'engins spécifiques comme un ripper ou un brise-roche.

Travaux

- Excavation et terrassement des couches de sol superficielles, à l'aide d'une pelle hydraulique
- Cette étape ne convient pas pour des sols de type 6 ou 7.
- Enlèvement du sol à l'aide de camions

Sources

- Pelle hydraulique
- Camions

Niveaux vibratoires

- Source dominante : pelle hydraulique
- Propagation
  - Source ponctuelle
  - Propagation surfacique

Source	Travaux	L_v à 7.5 m [mm/s]	Distance de sécurité [m]
Pelle hydraulique	Terrassement	0.8	6

Tableau 6.6

Discussion

La distance entre les chantiers des ouvrages d'art et les bâtiments est toujours supérieure à 6 m. Des dépassements ne sont pas attendus.

Scénario 2.1.2 – terrassement dans la roche

Ce scénario comprend des travaux de terrassement dans les couches de type 7, ce qui nécessite des engins spécifiques comme un brise-roche.

Travaux

- Excavation et terrassement des couches de sol type 7, à l'aide d'une pelle hydraulique munie d'un brise-roche, ou comme alternative une fraise de petite taille.
- Enlèvement du sol à l'aide de camions

Sources

- Pelle hydraulique munie d'un brise-roche
- Camions

Niveaux vibratoires

- Source dominante : brise-roche, alternative ; fraise de petite taille
- Propagation
  - Source ponctuelle
  - Propagation moyenne

Source	Travaux	L_v à 7.5 m [mm/s]	Distance de sécurité [m]
Brise-roche	Excavation	5	25
Fraise de petite taille	Excavation	1.5	10

Tableau 6.7

Discussion

La figure Figure 6.3 montre la zone de risque. La distance est partout supérieure à 25 m et des dépassements ne sont pas attendus.



Figure 6.3 Scénario 2.1.2 – distance de sécurité brise-roche

Scénario 2.1.3 – forage des pieux de fondation

Forage des pieux de fondation

Travaux

— Forage des pieux

Niveaux vibratoires

— Source dominante : foreuse
— Propagation
  — Source ponctuelle
  — Propagation volumique

Source	Travaux	L_v à 7.5 m [mm/s]	Distance de sécurité [m]
Foreuse	Forage des pieux	1	7.5

Tableau 6.8

Discussion

La distance entre les bâtiments et les forages est partout supérieure à 7.5 m. Des dépassements ne sont pas attendus.

Scénario 2.1.4 – montage des viaducs

Ce scénario comprend le montage des viaducs.

Travaux

— Montage des viaducs avec des grues de levage

Sources

— Grue de levage Liebherr L 1280 ou similaire, x2

Niveaux vibratoires

Généralement, ces activités ne provoquent pas de niveaux vibratoires importants.

Discussion

Pas de dépassements.

6.6.2.3 OA1533 – Passerelle

Les phases suivantes sont considérées ;

— Installation chantier et plateforme de travail
— Pieux, poutres de fondation et dalles flottantes
— Montage et assemblage structure métallique

Sur la base de ce phasage, les scénarios suivants sont définis ;

— Scénario 2.2.1 ; Travaux de forage des pieux de fondation
— Scénario 2.2.2 ; Montage de la passerelle

Les travaux les plus avec l'impact le plus important seront le forage des pieux de fondations et le montage de la passerelle, du côté nord de l'A4, où se trouvent les points récepteurs.

Scénario 2.2.1 – forage des fondations

Ce scénario comprend le forage des fondations.

Travaux

— Forage des pieux de fondations

Sources

— Foreuse

Niveaux vibratoires

— Source dominante : foreuse
— Propagation
    — Source ponctuelle
    — Propagation volumique

Source	Travaux	L_v à 7.5 m [mm/s]	Distance de sécurité [m]
Foreuse	Forage des pieux	1	7.5

Tableau 6.9

Discussion

La distance entre le chantier et les bâtiments est supérieure à 7.5 m et des dépassements ne sont pas attendus.

Scénario 2.2.2 – montage de la passerelle

Ce scénario comprend le montage de la passerelle

Travaux

— Montage des viaducs avec une grue de levage

Sources

— Grue de levage Liebherr LTM 1230 5.1 ou similaire

Niveaux vibratoires

Généralement, ces activités ne provoquent pas de niveaux vibratoires importants.

Discussion

Pas de dépassements.

6.6.2.4 OA1534 – Pont-rail

La distance entre cet ouvrage d'art et des points récepteurs est de plus de 170 m. Aucun impact n'est attendu.

6.6.2.5 OA1535 – Trémie tram

La distance entre cet ouvrage d'art et des points récepteurs est de plus de 200 m. Aucun impact n'est attendu.

6.6.2.6 OA1537 – Pont-rail

La distance entre cet ouvrage d'art et des points récepteurs est de plus de 200 m. Aucun impact n'est attendu.

6.6.2.7 OA1538 – Trémie tram

Cet ouvrage d'art se trouve sur le tracé et l'évaluation des travaux avec le plus d'impact, comme le terrassement dans la roche, a déjà été évalué dans le cadre de la réalisation des voies, chapitre 6.6.1.

Cette évaluation a montré que des dépassements ne sont pas attendus dans les points les plus proches de cet ouvrage d'art.

6.6.2.8 OA1541 – Viaduc tramway Pontpierre

Les phases suivantes sont considérées ;

- Installation chantier et plateforme de travail
- Pieux, poutres de fondation et dalles flottantes
- Piles
- Montage et assemblage structure métallique
- Talutage

Sur la base de ce phasage, les scénarios suivants sont définis ;

- Scénario 2.3.1 ; Terrassement superficiel (terres meubles), en utilisant une pelle
- Scénario 2.3.2 ; Terrassement dans la roche, en utilisant un brise-roche
- Scénario 2.3.3 ; Travaux de forage des pieux de fondation
- Scénario 2.3.4 ; Montage des viaducs

Scénario 2.3.1 – terrassement superficiel

Ce scénario comprend des travaux de terrassement superficiel ; les premières couches de sol, qui ne nécessitent pas d'engins spécifiques comme un ripper ou un brise-roche.

Travaux

- Excavation et terrassement des couches de sol superficielles, à l'aide d'une pelle hydraulique
- Cette étape ne convient pas pour des sols de type 6 ou 7.
- Enlèvement du sol à l'aide de camions

Sources

- Pelle hydraulique
- Camions

Niveaux vibratoires

- Source dominante : pelle hydraulique
- Propagation
    - Source ponctuelle
    - Propagation surfacique

Source	Travaux	L_v à 7.5 m [mm/s]	Distance de sécurité [m]
Pelle hydraulique	Terrassement	0.8	6

Tableau 6.10

Discussion

La distance entre les chantiers des ouvrages d'art et les bâtiments est toujours supérieure à 6 m. Des dépassements ne sont pas attendus.

Scénario 2.3.2 – terrassement dans la roche

Ce scénario comprend des travaux de terrassement dans les couches de type 7, ce qui nécessite des engins spécifiques comme un brise-roche.

Travaux

- Excavation et terrassement des couches de sol type 7, à l'aide d'une pelle hydraulique munie d'un brise-roche, ou comme alternative une fraise de petite taille.
- Enlèvement du sol à l'aide de camions

Sources

- Pelle hydraulique munie d'un brise-roche
- Camions

Niveaux vibratoires

- Source dominante : brise-roche, alternative ; fraise de petite taille
- Propagation
  - Source ponctuelle
  - Propagation moyenne

Source	Travaux	L_v à 7.5 m [mm/s]	Distance de sécurité [m]
Brise-roche	Excavation	5	25
Fraise de petite taille	Excavation	1.5	10

Tableau 6.11

Discussion

La figure 6.4 montre la zone de risque. La distance est partout supérieure à 25 m et des dépassements ne sont pas attendus.



Figure 6.4 Scénario 2.3.2 – distance de sécurité brise-roche

Scénario 2.3.3 – forage des pieux de fondation

Forage des pieux de fondation

Travaux

- Forage des pieux

Niveaux vibratoires

- Source dominante : foreuse

- Propagation
  - Source ponctuelle
  - Propagation volumique

Source	Travaux	L_v à 7.5 m [mm/s]	Distance de sécurité [m]
Foreuse	Forage des pieux	1	7.5

Tableau 6.12

Discussion

La distance entre les bâtiments et les forages est partout supérieure à 7.5 m. Des dépassements ne sont pas attendus.

Scénario 2.3.4 – montage des viaducs

Ce scénario comprend le montage des viaducs.

Travaux

- Montage des viaducs avec des grues de levage

Sources

- Grue de levage Liebherr L 1280 ou similaire, x2

Niveaux vibratoires

Généralement, ces activités ne provoquent pas de niveaux vibratoires importants.

Discussion

Pas de dépassements.

6.6.2.9 OA1542 – Viaduc tramway Foetz

Les phases suivantes sont considérées ;

- Installation chantier et plateforme de travail
- Pieux, poutres de fondation et dalles flottantes
- Piles
- Montage et assemblage structure métallique
- Talutage

Sur la base de ce phasage, les scénarios suivants sont définis ;

- Scénario 2.4.1 ; Terrassement superficiel (terres meubles), en utilisant une pelle
- Scénario 2.4.2 ; Terrassement dans la roche, en utilisant un brise-roche
- Scénario 2.4.3 ; Travaux de forage des pieux de fondation
- Scénario 2.4.4 ; Montage des viaducs

Scénario 2.4.1 – terrassement superficiel

Ce scénario comprend des travaux de terrassement superficiel ; les premières couches de sol, qui ne nécessitent pas d'engins spécifiques comme un ripper ou un brise-roche.

Travaux

- Excavation et terrassement des couches de sol superficielles, à l'aide d'une pelle hydraulique
- Cette étape ne convient pas pour des sols de type 6 ou 7.
- Enlèvement du sol à l'aide de camions

Sources

- Pelle hydraulique
- Camions

Niveaux vibratoires

- Source dominante : pelle hydraulique
- Propagation
    - Source ponctuelle
    - Propagation surfacique

Source	Travaux	L_v à 7.5 m [mm/s]	Distance de sécurité [m]
Pelle hydraulique	Terrassement	0.8	6

Tableau 6.13

Discussion

La distance entre les chantiers des ouvrages d'art et les bâtiments est toujours supérieure à 6 m. Des dépassements ne sont pas attendus.

Scénario 2.4.2 – terrassement dans la roche

Ce scénario comprend des travaux de terrassement dans les couches de type 7, ce qui nécessite des engins spécifiques comme un brise-roche.

Travaux

- Excavation et terrassement des couches de sol type 7, à l'aide d'une pelle hydraulique munie d'un brise-roche, ou comme alternative une fraise de petite taille.
- Enlèvement du sol à l'aide de camions

Sources

- Pelle hydraulique munie d'un brise-roche
- Camions

Niveaux vibratoires

- Source dominante : brise-roche, alternative ; fraise de petite taille
- Propagation
  - Source ponctuelle
  - Propagation moyenne

Source	Travaux	L_v à 7.5 m [mm/s]	Distance de sécurité [m]
Brise-roche	Excavation	5	25
Fraise de petite taille	Excavation	1.5	10

Tableau 6.14

Discussion

La figure 6.5 montre la zone de risque. La distance est partout supérieure à 25 m et des dépassements ne sont pas attendus.

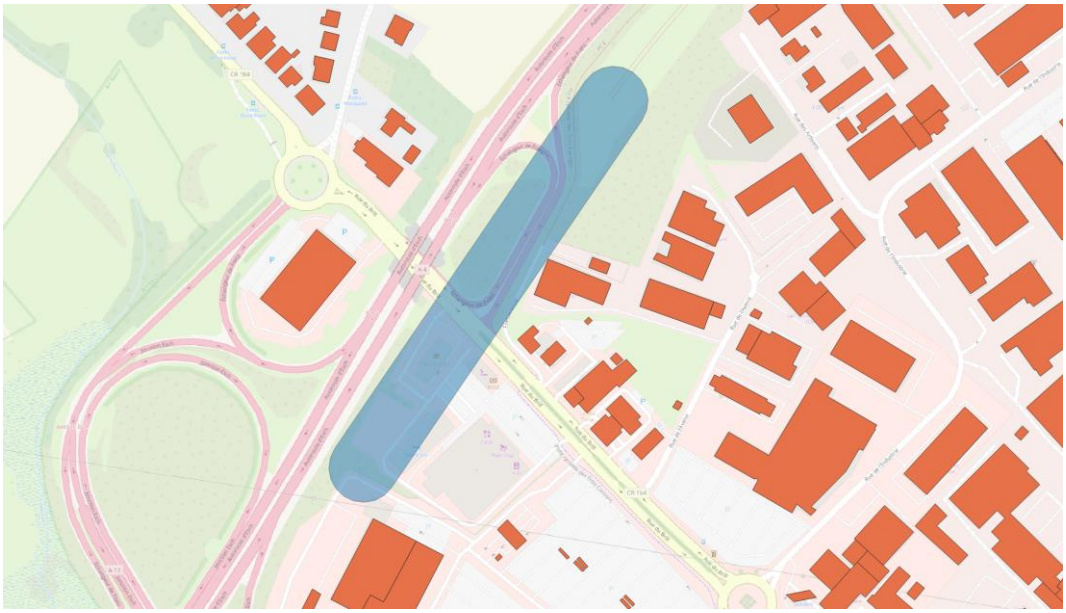


Figure 6.5 Scénario 2.4.2 – distance de sécurité brise-roche

Scénario 2.4.3 – forage des pieux de fondation

Forage des pieux de fondation

Travaux

- Forage des pieux

Niveaux vibratoires

- Source dominante : foreuse
- Propagation

— Source ponctuelle
— Propagation volumique

Source	Travaux	L_v à 7.5 m [mm/s]	Distance de sécurité [m]
Foreuse	Forage des pieux	1	7.5

Tableau 6.15

Discussion

La distance entre les bâtiments et les forages est partout supérieure à 7.5 m. Des dépassements ne sont pas attendus.

Scénario 2.4.4 – montage des viaducs

Ce scénario comprend le montage des viaducs.

Travaux

— Montage des viaducs avec des grues de levage

Sources

— Grue de levage Liebherr L 1280 ou similaire, x2

Niveaux vibratoires

Généralement, ces activités ne provoquent pas de niveaux vibratoires importants.

Discussion

Pas de dépassements.

6.6.3 La construction des sous-stations de traction

Trois sous-stations de traction sont réalisées ; une à Leudelange, une à Pontpierre et la dernière à Foetz.

La sous-station de Leudelange se trouve près des points récepteurs 17 et 16, des bâtiments commerciaux. Toutefois, la distance est de plus de 25 m, la distance de sécurité pour l'utilisation d'un brise-roche, la source la plus impactante. Des dépassements ne sont pas attendus.

La sous-station de Pontpierre se trouve à plus de 170 m du point récepteur le plus proche et il n'y aura pas d'impact.

La sous-station de Foetz se trouve entre la future voie et l'A4. La distance entre la sous-station et le bâtiment le plus proche est de 70 m ; ce bâtiment se trouve de l'autre côté de l'autoroute et il s'agit d'un hangar. Les autres bâtiments (commerciaux) se trouvent à plus de 100 m. Un impact n'est pas attendu

7 CONCLUSION

Phase exploitation

L'étude a comme objectif le calcul prédictif vibratoire pour permettre, sur la base du tracé des voies, des fréquences de passage des trams et des types de trams utilisés, d'établir les zones du tracé qui vont requérir une technique de pose de voie antivibratoire afin de répondre à l'exigence de la norme de confort vibratoire chez les riverains.

Les calculs prédictifs présentés sont basés sur des mesures in situ et des données reçues du client. La source vibratoire du tram a été mesurée à Luxembourg, à un endroit où le tram circule déjà. La propagation des vibrations dans le sol a été mesurée en plusieurs points représentatifs le long du futur tracé. Sur la base de ces données, le calcul prédictif a été effectué, le cas échéant, avec un type de pose de voie antivibratoire (« - 8 dB », « - 16 dB » ou « - 20 dB »). Les résultats de ces calculs sont ensuite extrapolés pour en déduire une proposition d'un type de pose de voie à prévoir sur tout le tracé.

Les conclusions prennent en considération les distances entre les futures voies et le plan d'aménagement général.

- Dans la variante « Tracé antérieur », il est recommandé de prévoir un système « - 8 dB » entre les PM's suivants ;
  - de 6275 à 6360 (figure 5.16) ;
  - de 7530 à 7600 (figure 5.17) ;
  - de 7860 à 7975 (figure 5.18).
- Dans la variante « Tracé optimisé », des mesures de mitigation ne sont pas nécessaires pour tout le tracé étudié (TRA et TRB). Le paramètre d'évaluation KB_F, la vitesse vibratoire, pondérée selon la norme DIN 45669-1 ne dépassera jamais la valeur limite A_U de 0.1 pendant la nuit dans une zone résidentielle.

La variante « Tracé optimisé » est la variante préférée en termes de vibrations dans la phase exploitation. Moins de bâtiments seront exposés aux vibrations du tramway ; notamment, les habitations situées près de la rue d'Europe à Pontpierre seront épargnées, car dans cette variante, les voies y passent au nord de l'autoroute A4.

Phase chantier

La phase chantier du projet a également été étudiée ; les incidences vibratoires des procédés de travail susceptibles d'être mis en œuvre seront qualifiées.

Les travaux de construction consistent en trois aspects suivants ;

- la réalisation des voies ;
- la construction des ouvrages d'art ;
- la construction des sous-stations de traction.

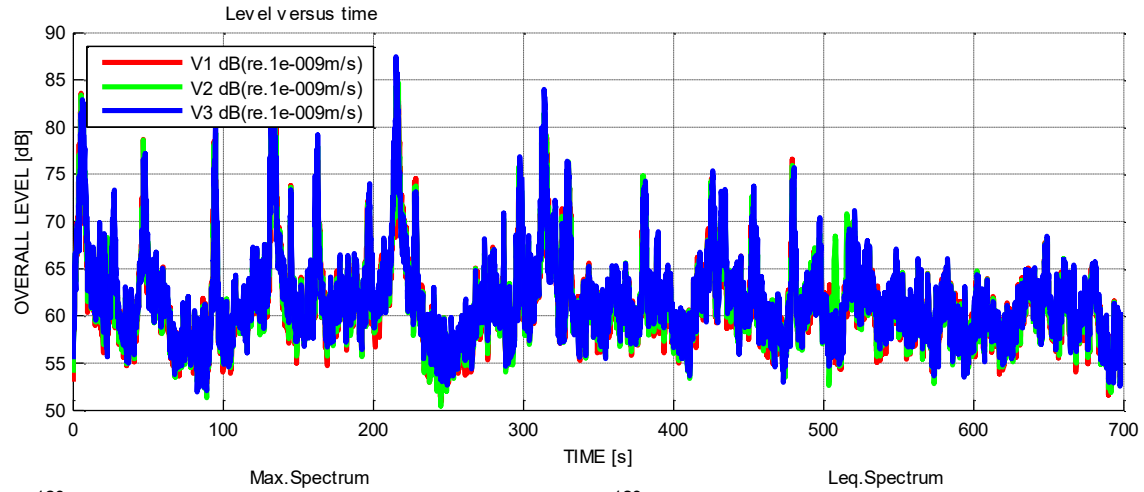
À cause de la distance assez importante entre les chantiers et les bâtiments, des dépassements des limites applicables ne sont pas attendus.

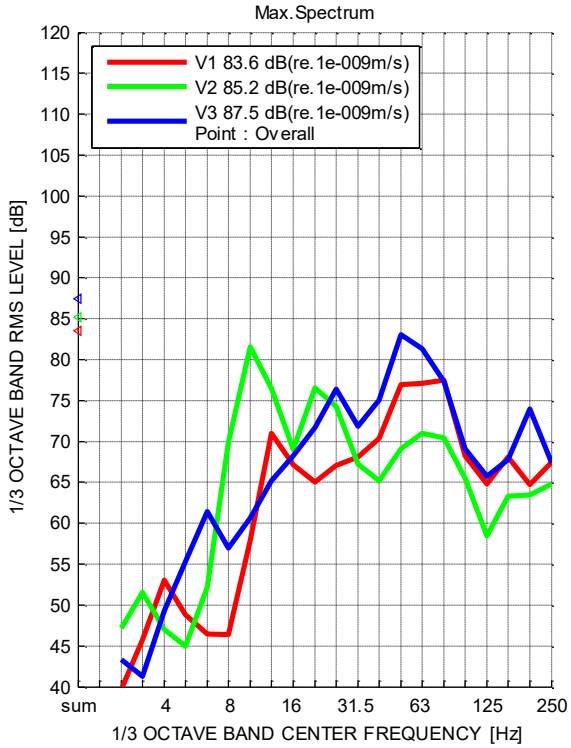
ANNEXE A – ÉTAT INITIAL, DÉTAILS DES MESURES

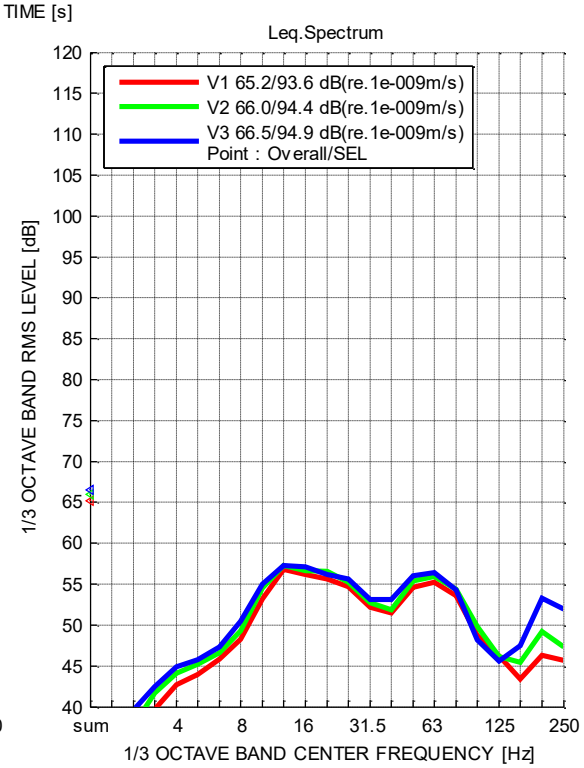
PROJECT: Tram rapide Esch SECTION: P1

REC: REC001_01.mat REMARQUE: Trafic local: Plusieurs bus, voitures, poids lourds

TIME: 30/09/2024 09:56:01



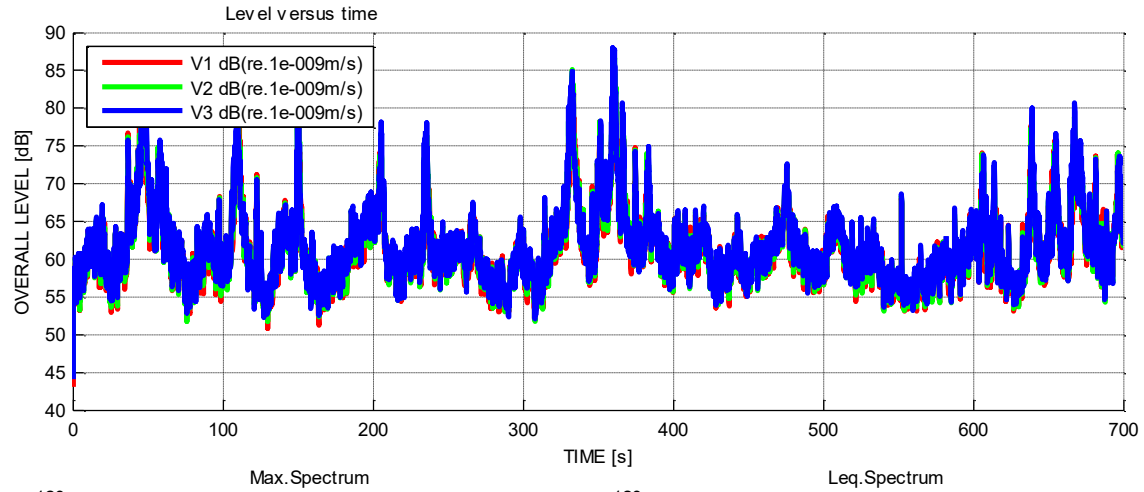


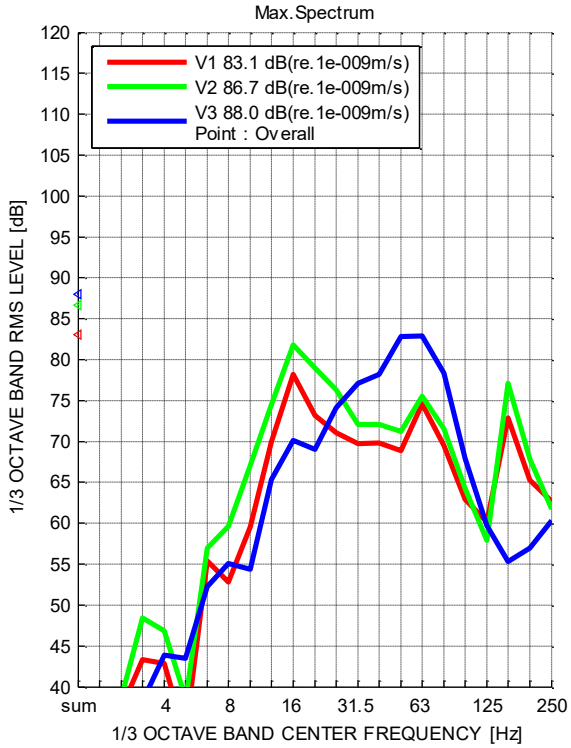


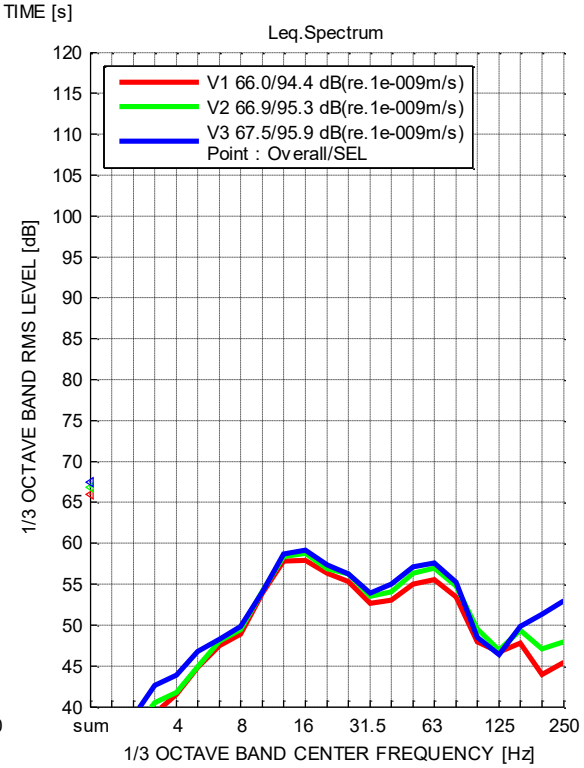
PROJECT: Tram rapide Esch SECTION: P1

REC: REC001_02.mat REMARQUE: Trafic local: Plusieurs bus, voitures, poids lourds

TIME: 30/09/2024 10:07:41



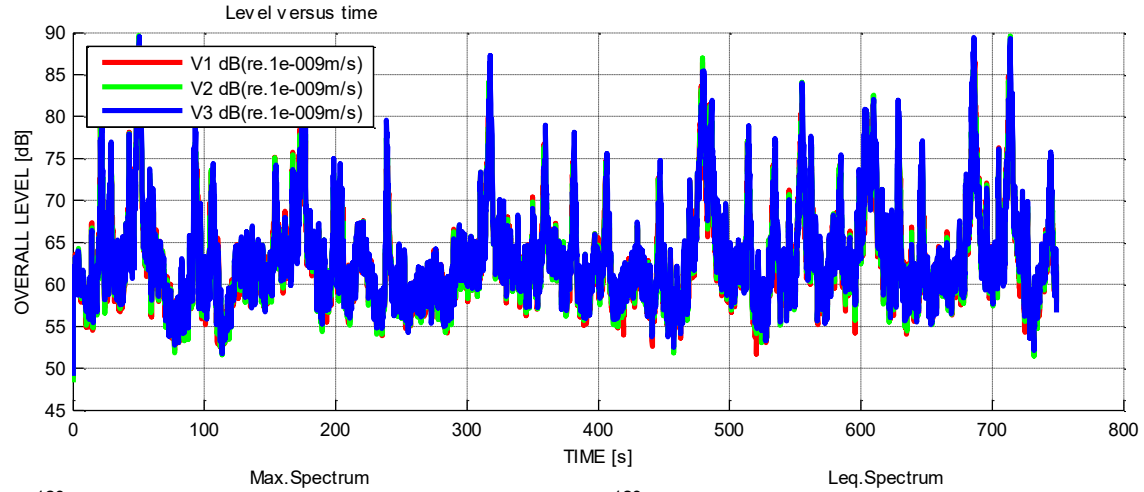


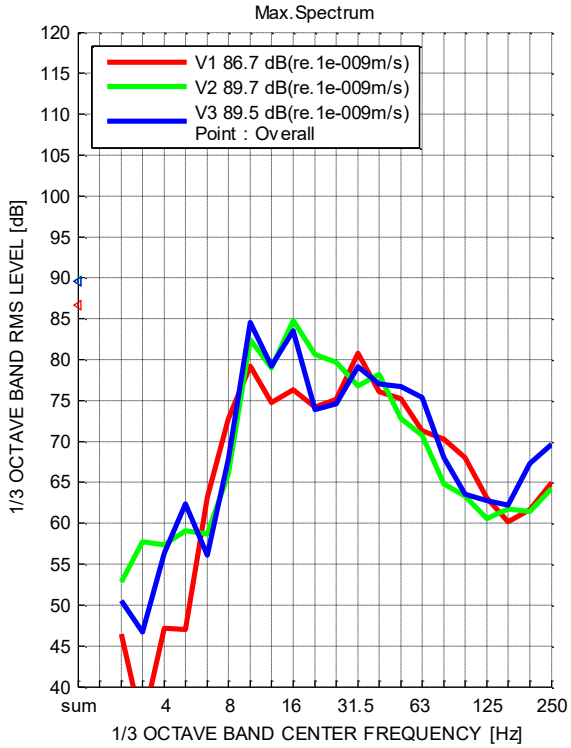


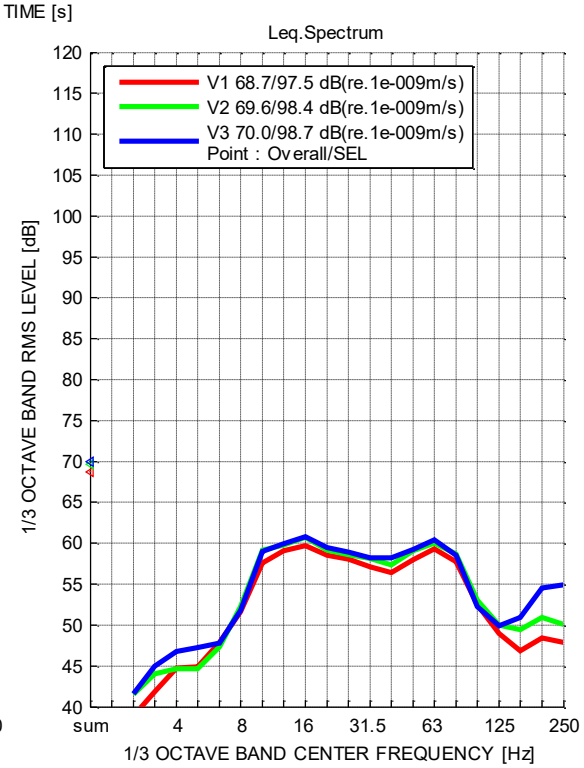
PROJECT: Tram rapide Esch SECTION: P1

REC: REC001_03.mat REMARQUE: Trafic local: Plusieurs bus, voitures, poids lourds

TIME: 30/09/2024 10:19:21



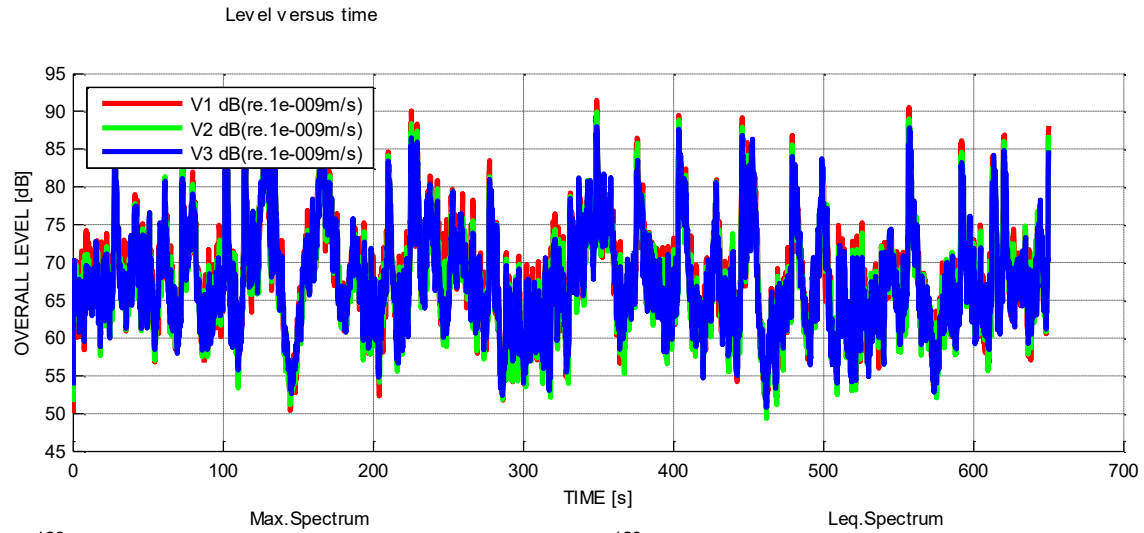


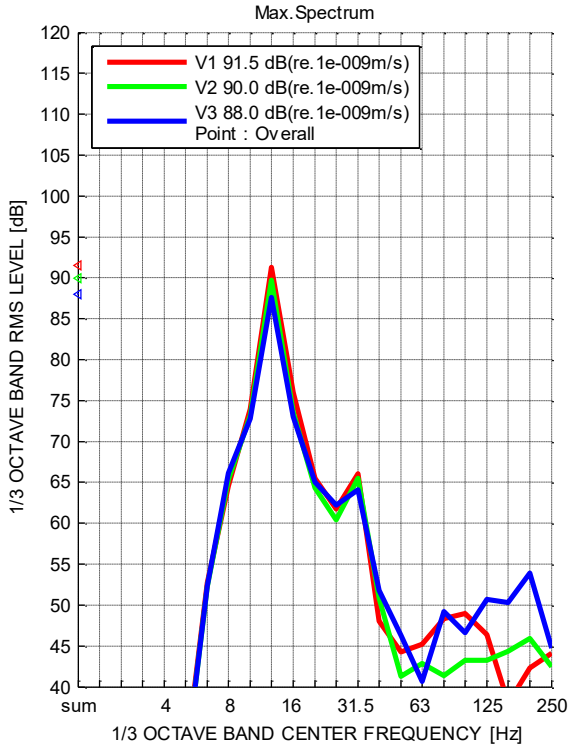


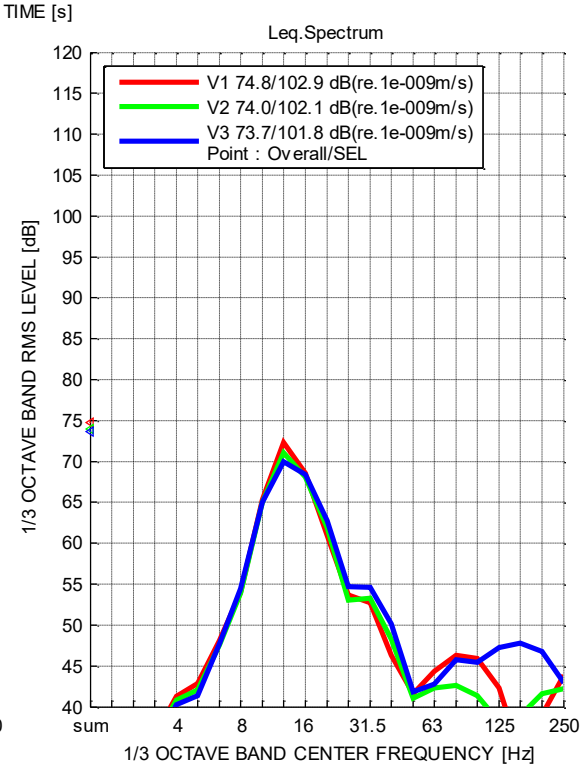
PROJECT: Tram rapide Esch SECTION: P2

REC: REC002_01.mat REMARQUE: Autoroute: Plusieurs bus, voitures, poids lourds

TIME: 30/09/2024 10:46:08



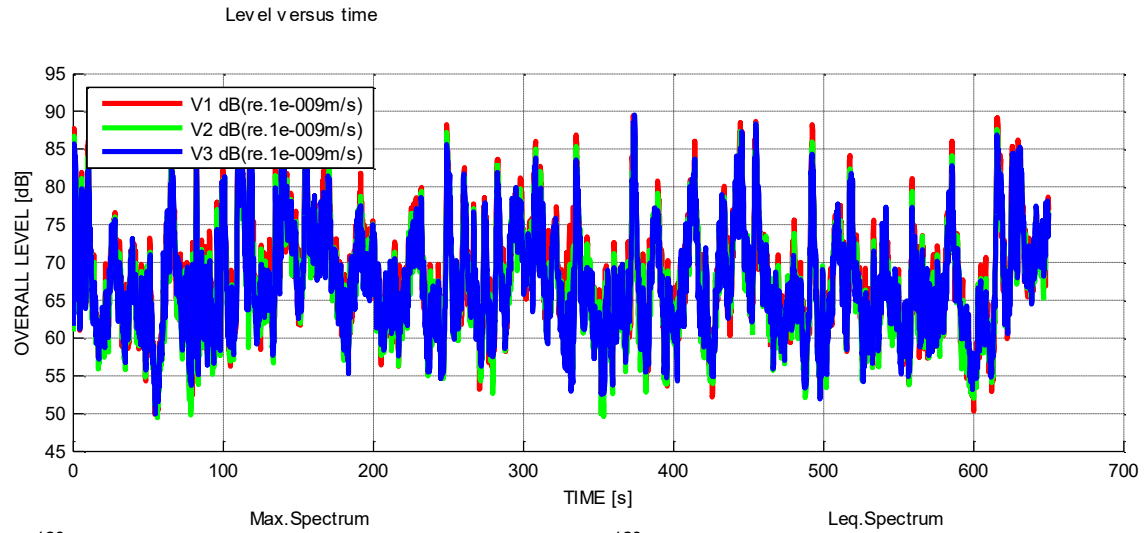


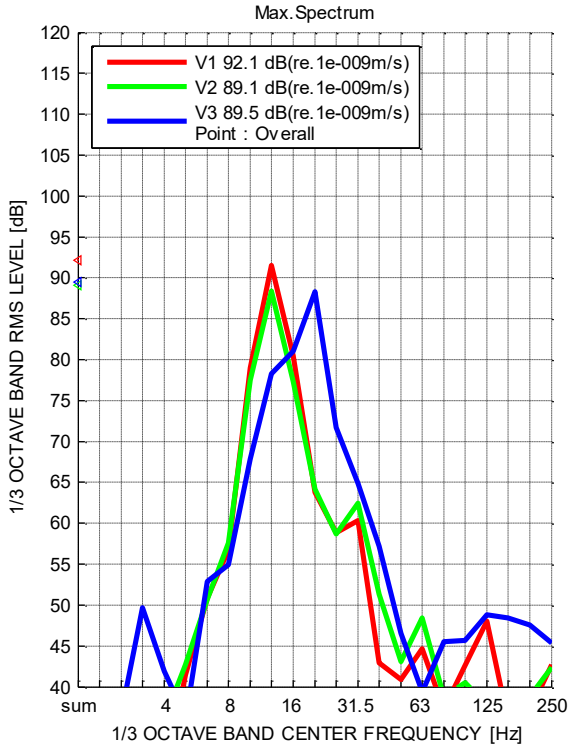


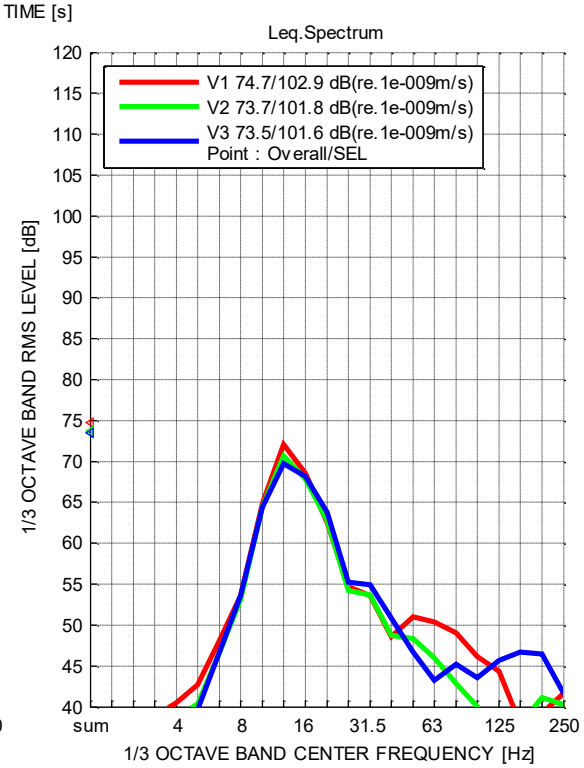
PROJECT: Tram rapide Esch SECTION: P2

REC: REC002_02.mat REMARQUE: Autoroute: Plusieurs bus, voitures, poids lourds

TIME: 30/09/2024 10:56:58



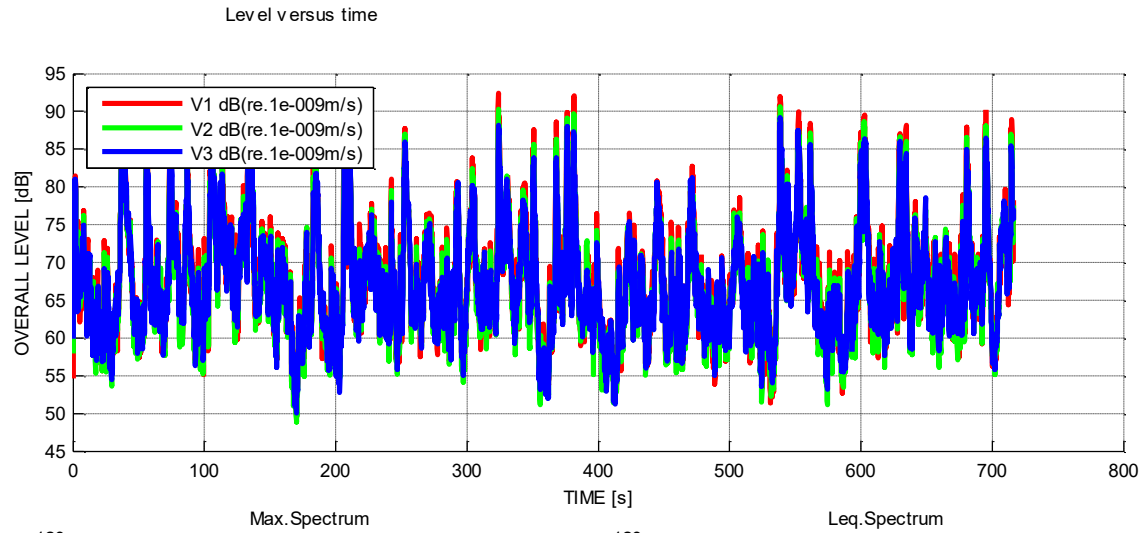


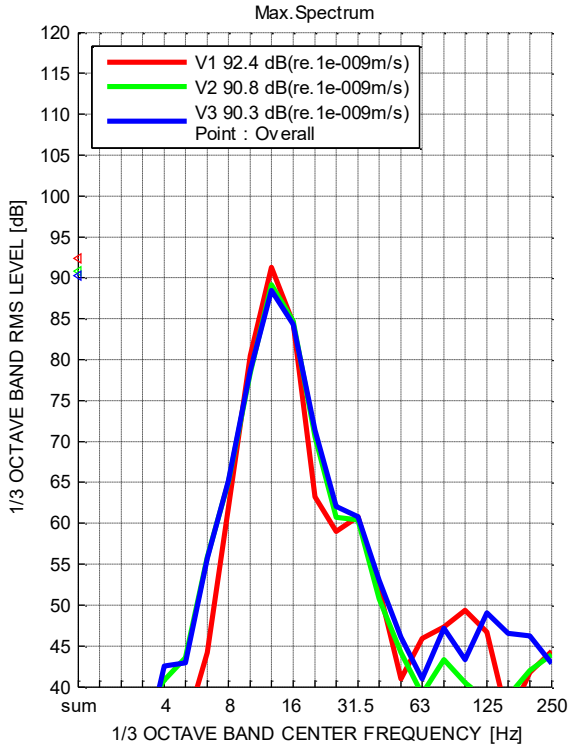


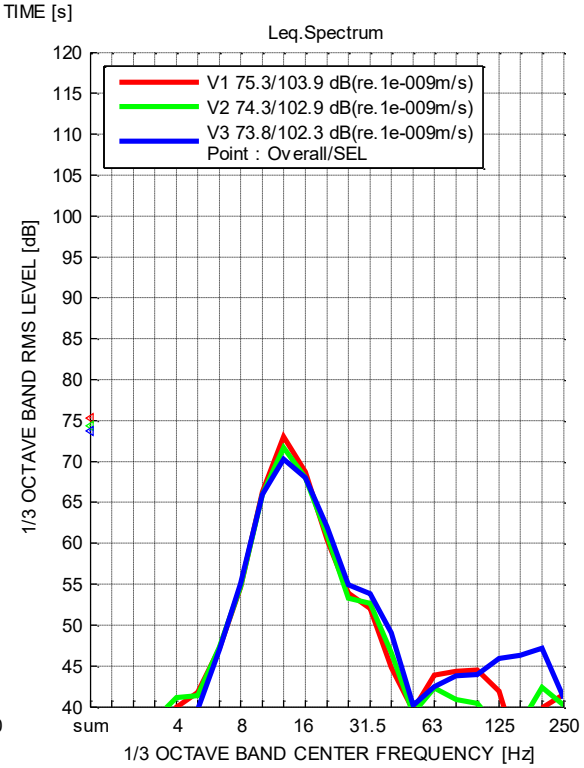
PROJECT: Tram rapide Esch SECTION: P2

REC: REC002_03.mat REMARQUE: Autoroute: Plusieurs bus, voitures, poids lourds

TIME: 30/09/2024 11:07:48



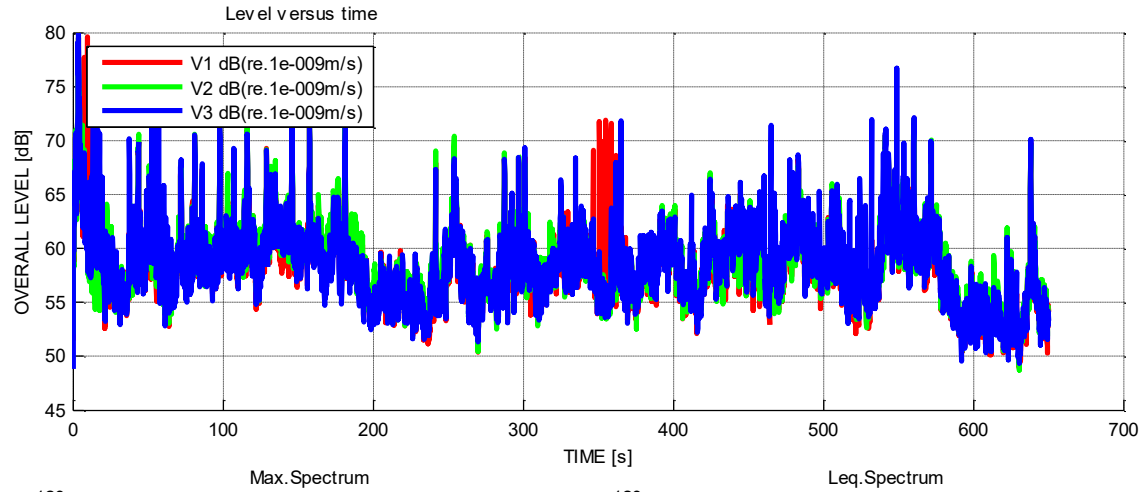


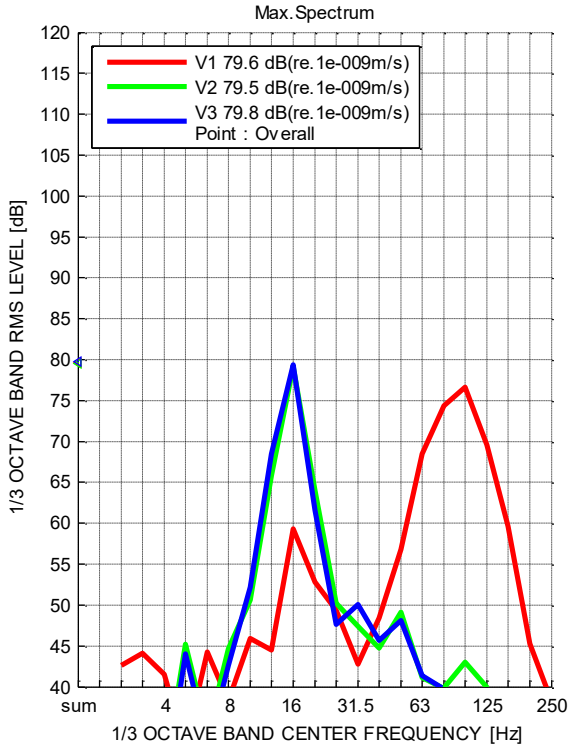


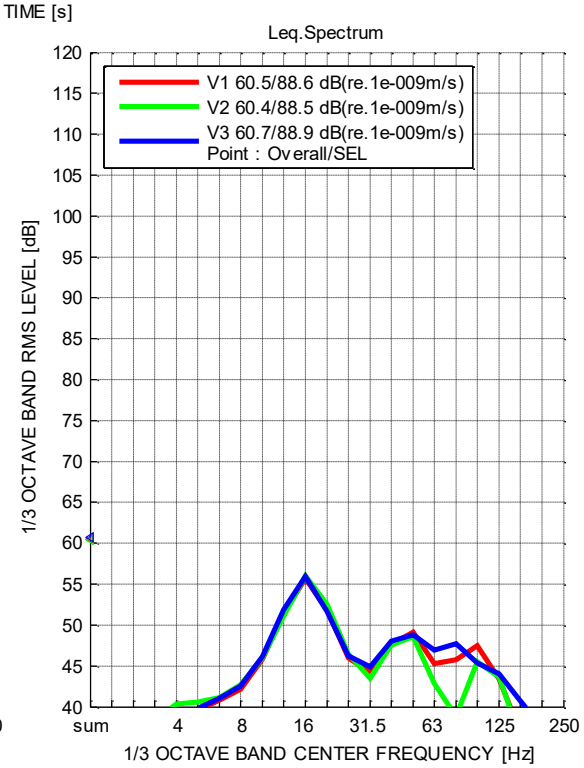
PROJECT: Tram rapide Esch SECTION: P3

REC: REC003_01.mat REMARQUE: Autoroute à 80 m : Poids lourds et bus

TIME: 30/09/2024 11:36:14



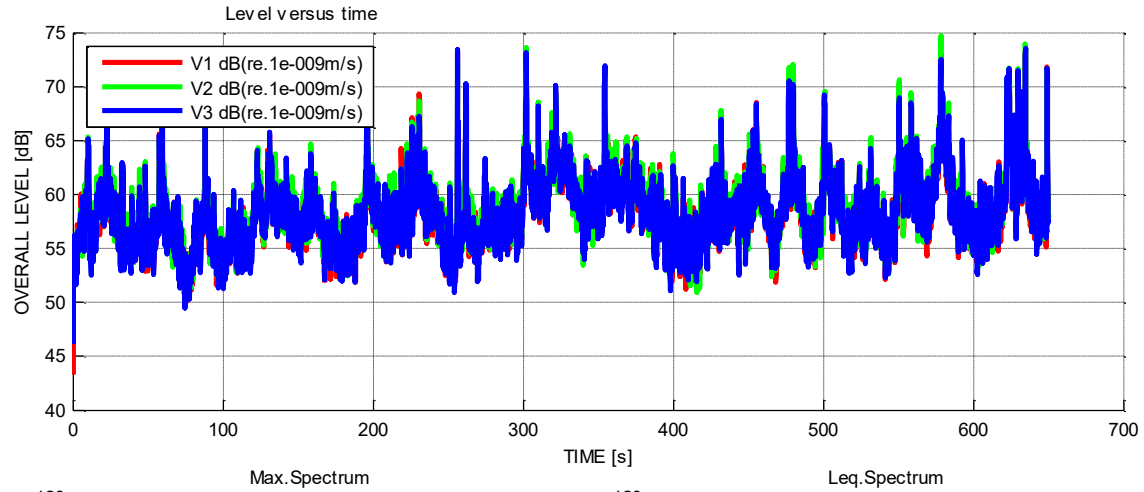


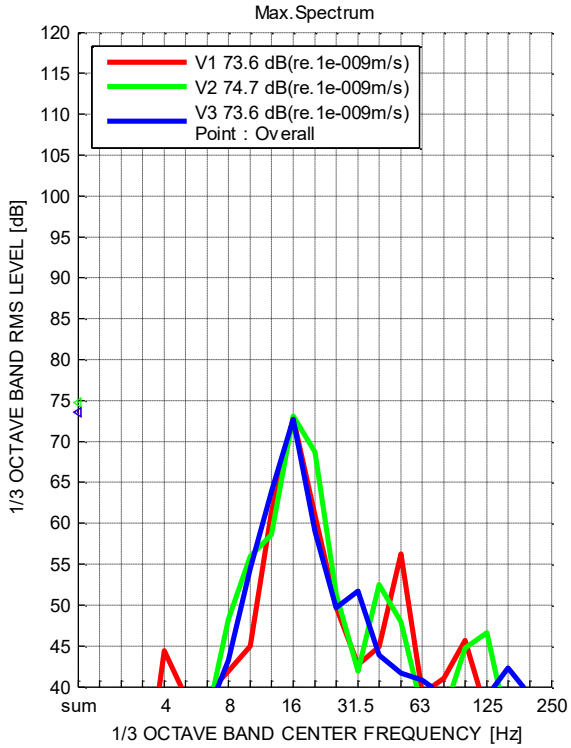


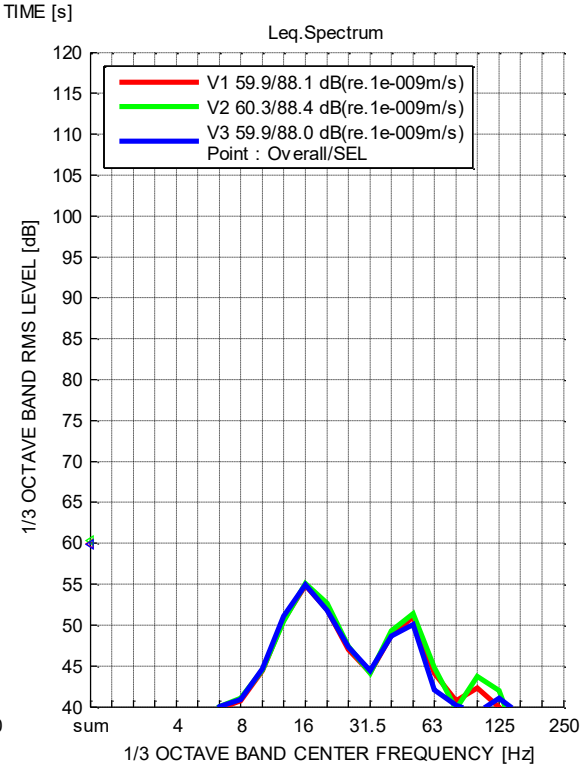
PROJECT: Tram rapide Esch SECTION: P3

REC: REC003_02.mat REMARQUE: Autoroute à 80 m : Poids lourds et bus

TIME: 30/09/2024 11:47:04



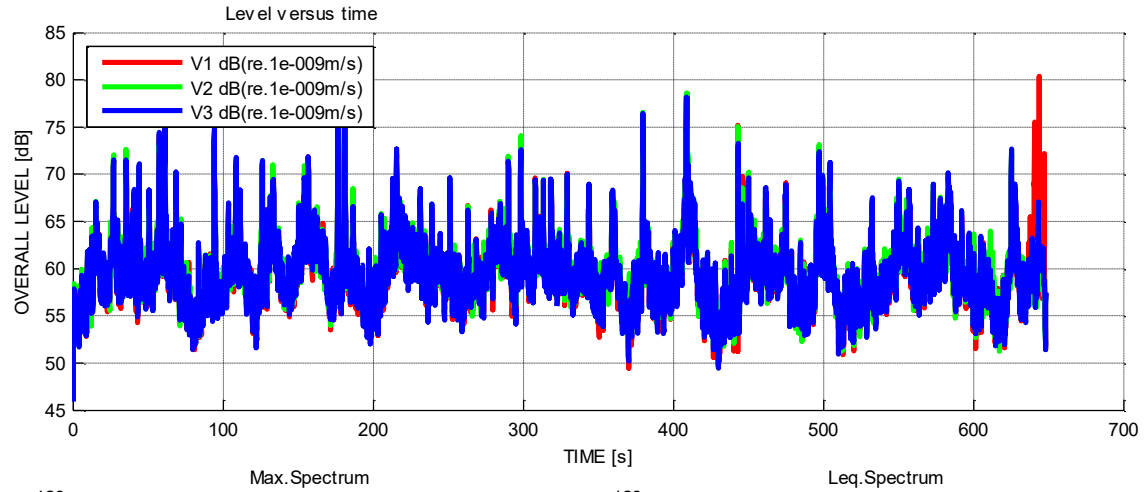


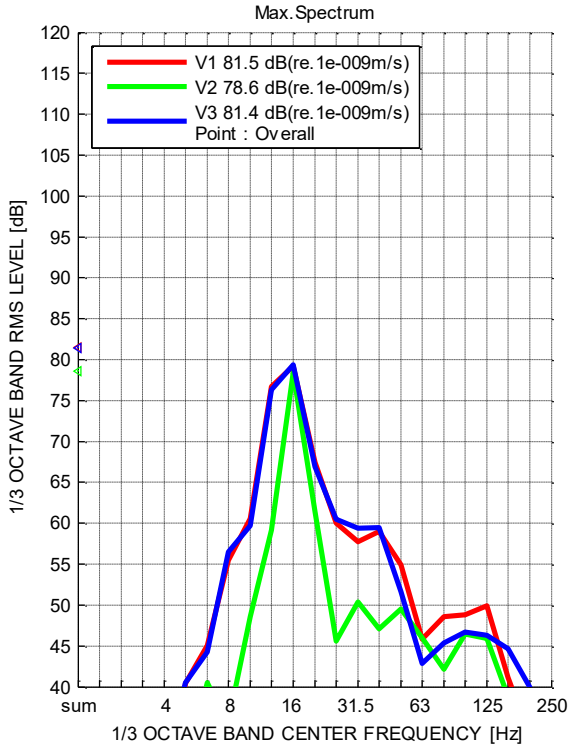


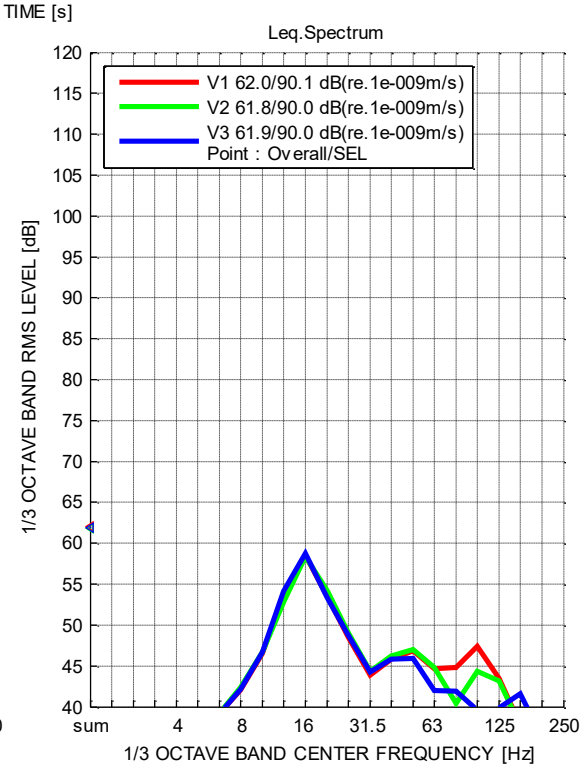
PROJECT: Tram rapide Esch SECTION: P3

REC: REC003_03.mat REMARQUE: Autoroute à 80 m : Poids lourds et bus

TIME: 30/09/2024 11:57:54



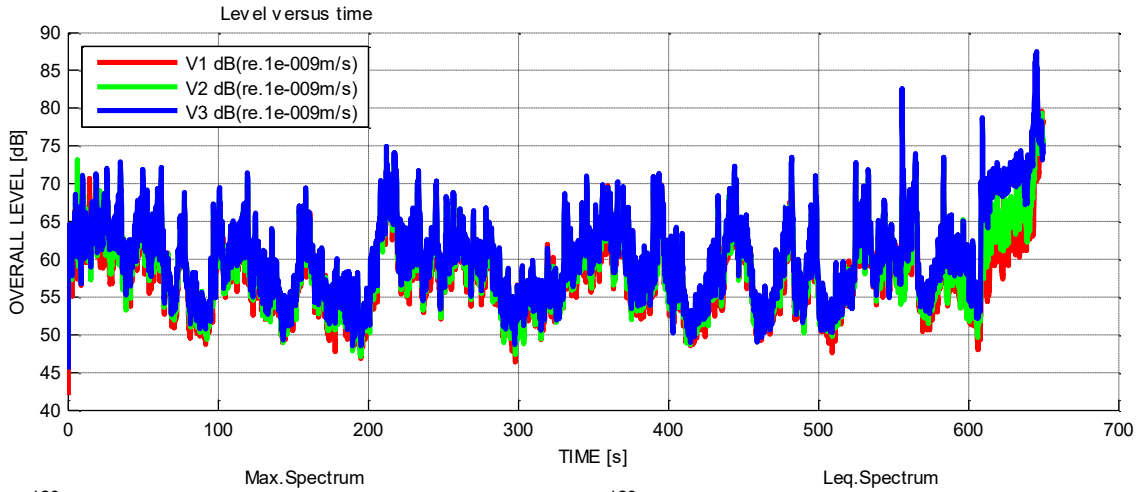


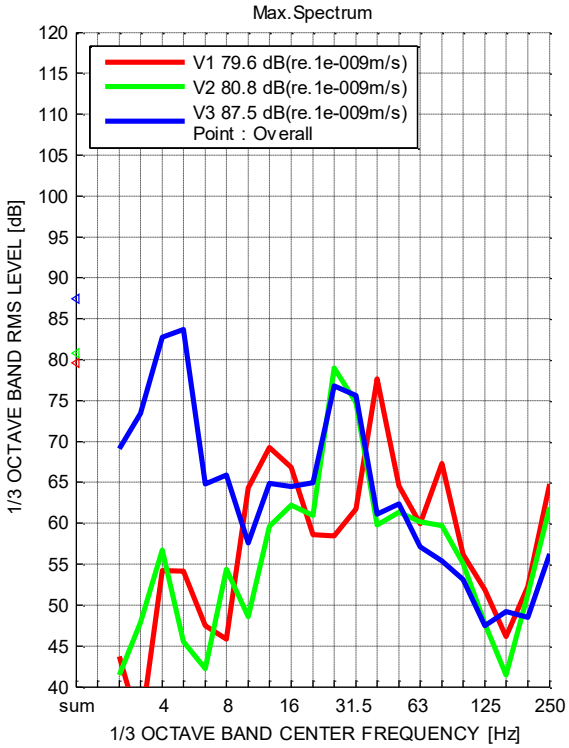


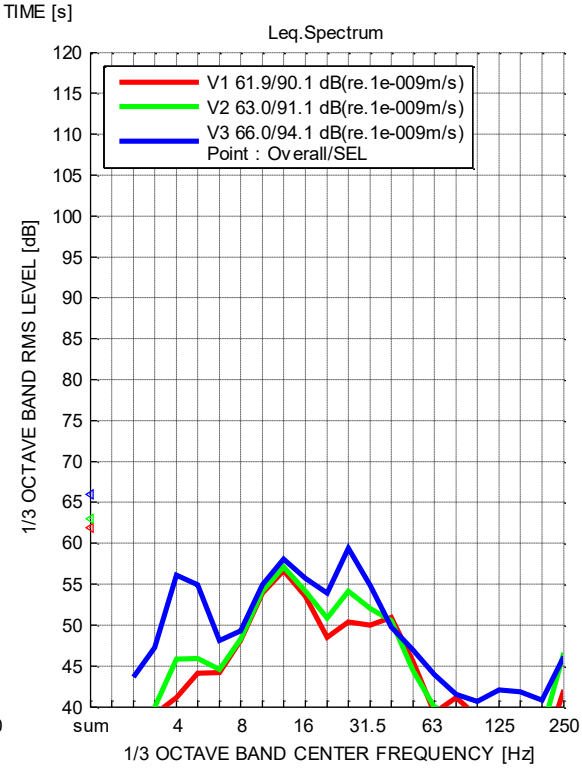
PROJECT: Tram rapide Esch SECTION: P4

REC: REC004_01.mat REMARQUE: Autoroute et trafic local (travaux)

TIME: 30/09/2024 12:19:38



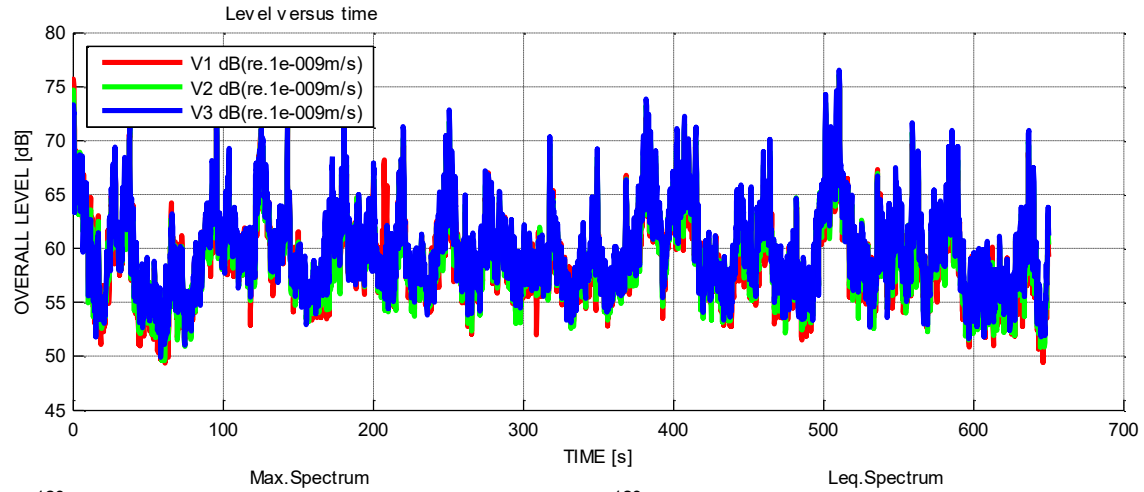


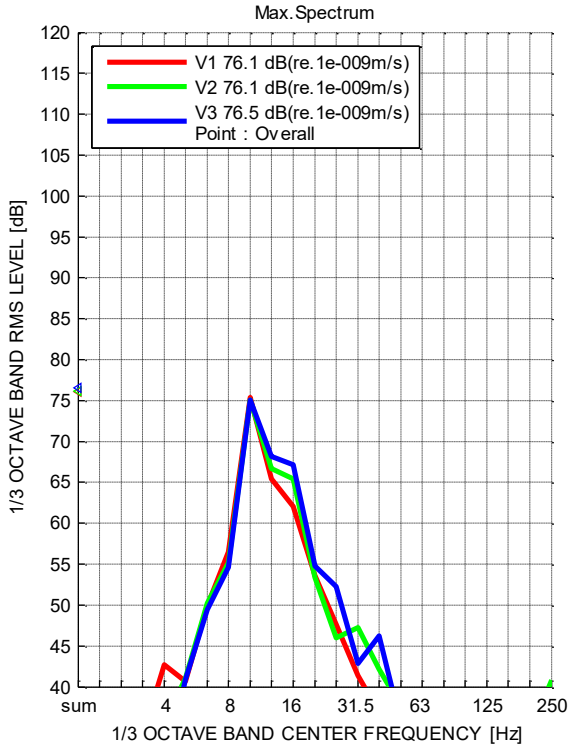


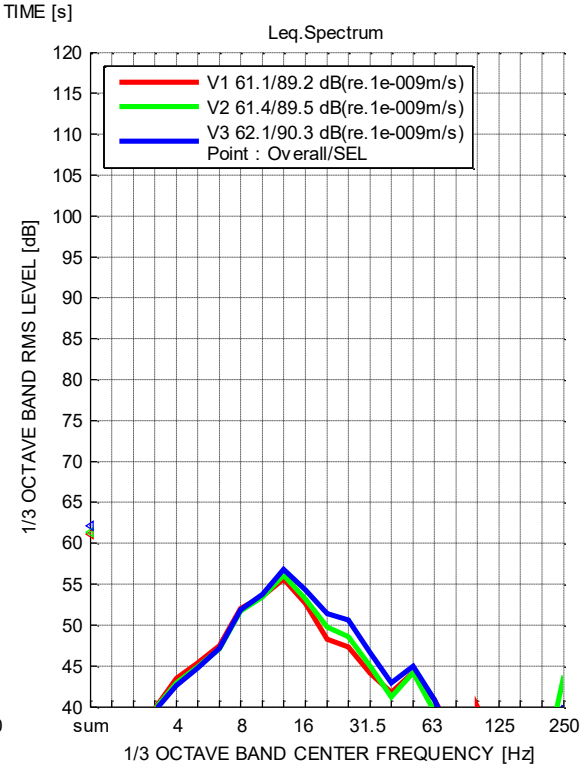
PROJECT: Tram rapide Esch SECTION: P4

REC: REC004_02.mat REMARQUE: Autoroute et trafic local (travaux)

TIME: 30/09/2024 12:30:28



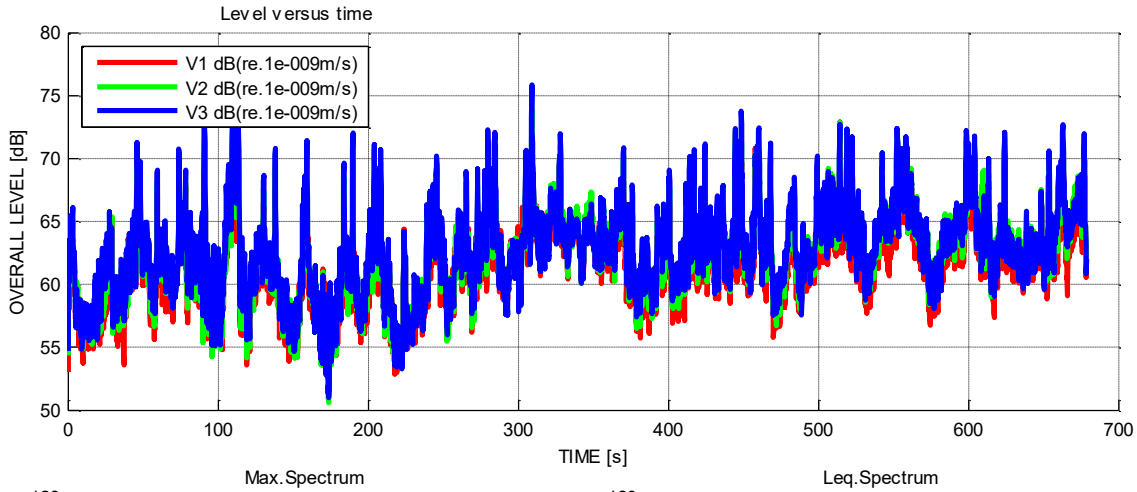


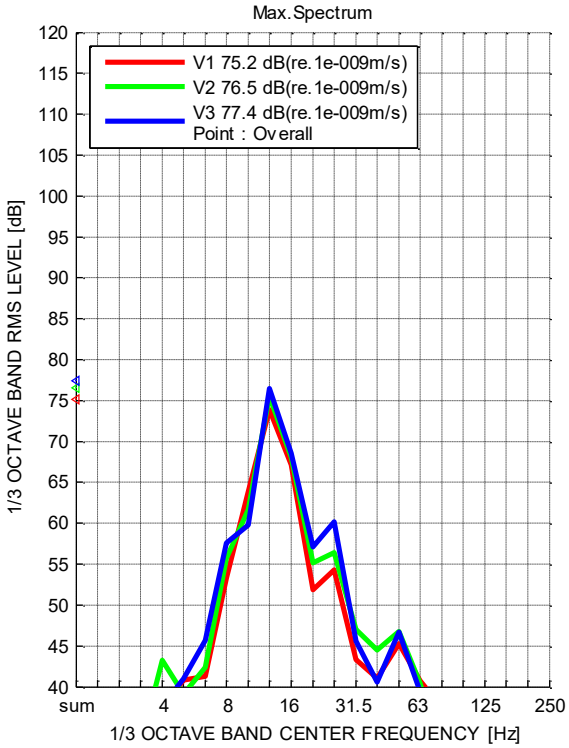


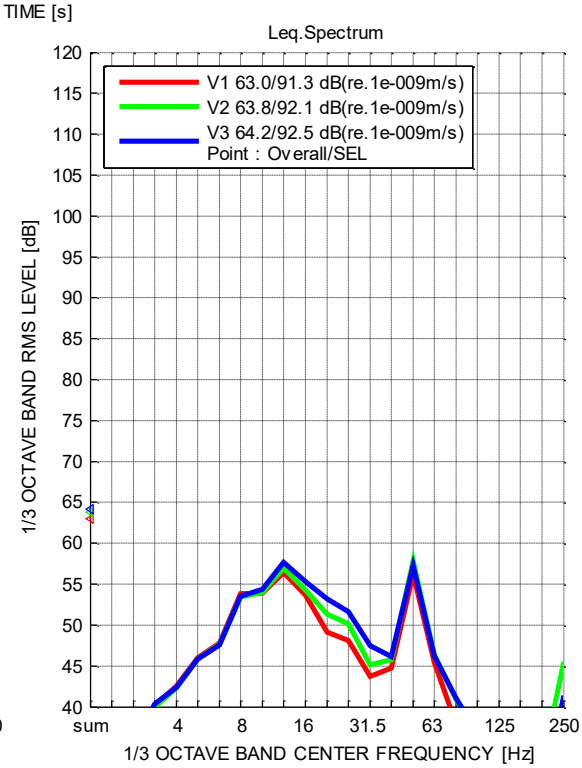
PROJECT: Tram rapide Esch SECTION: P4

REC: REC004_03.mat REMARQUE: Autoroute et trafic local (travaux)

TIME: 30/09/2024 12:41:18



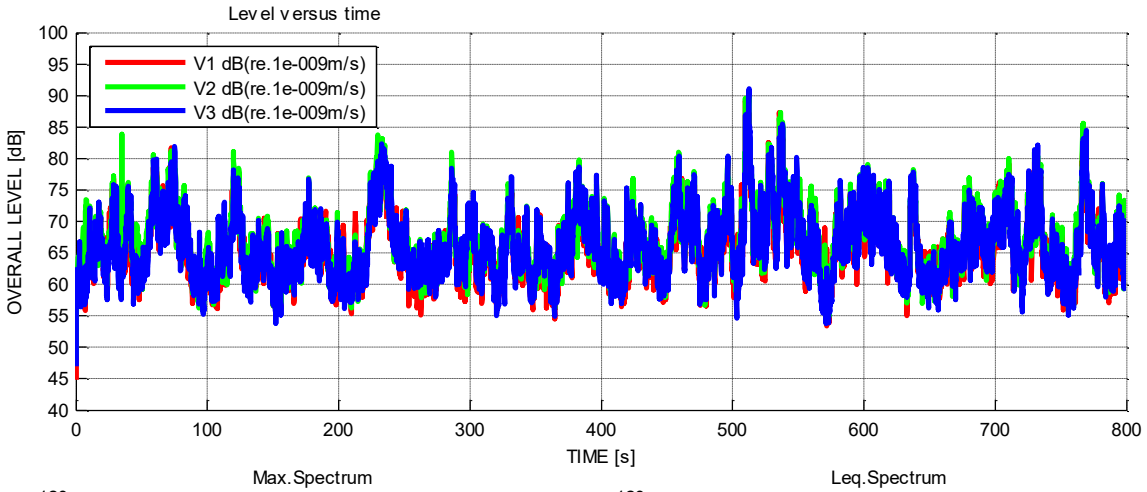


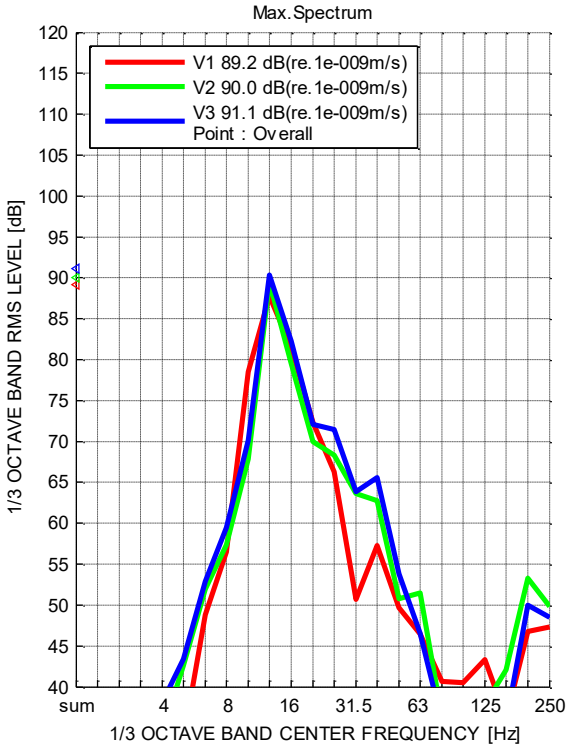


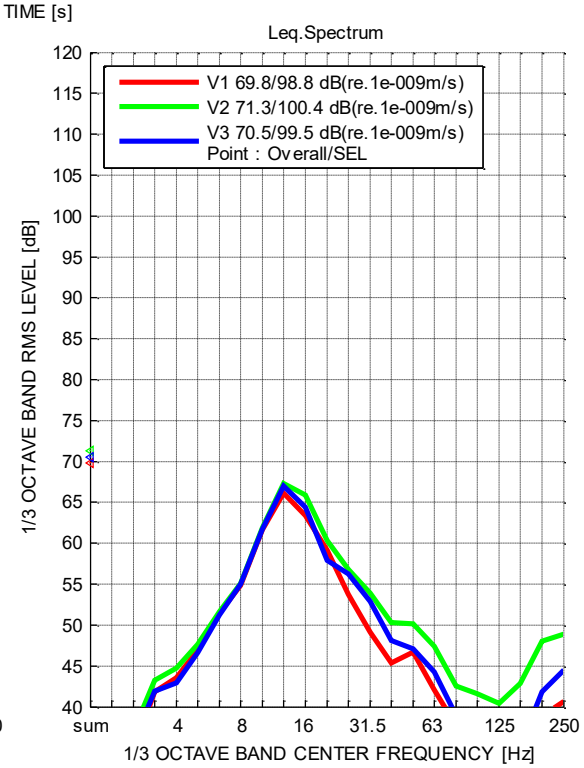
PROJECT: Tram rapide Esch SECTION: P5

REC: REC006_01.mat REMARQUE: Trafic sur bretelle autoroute, circulation locale

TIME: 30/09/2024 14:25:58



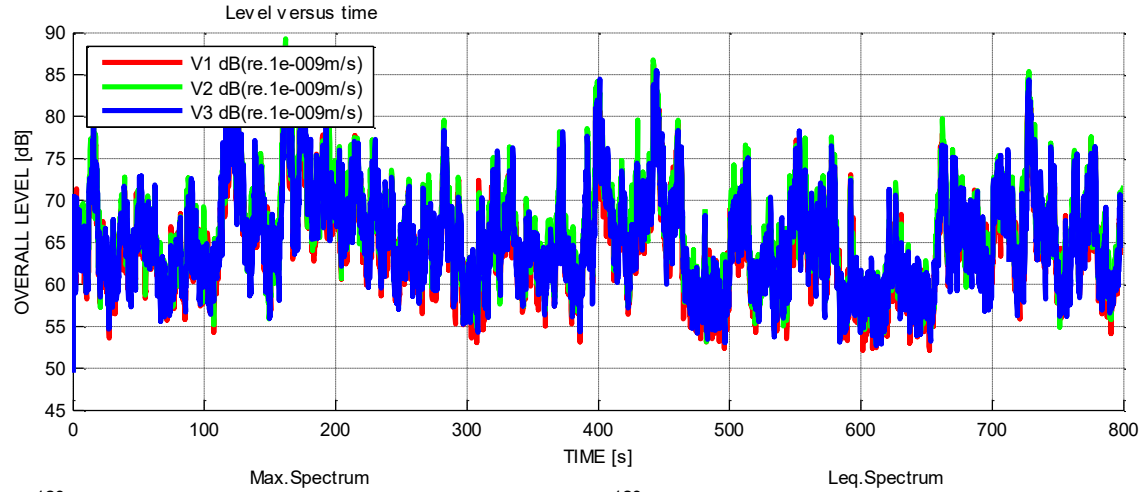


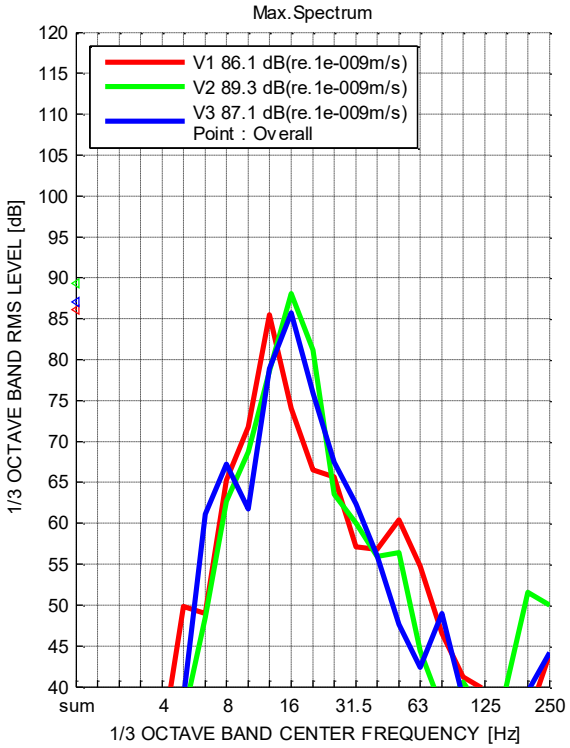


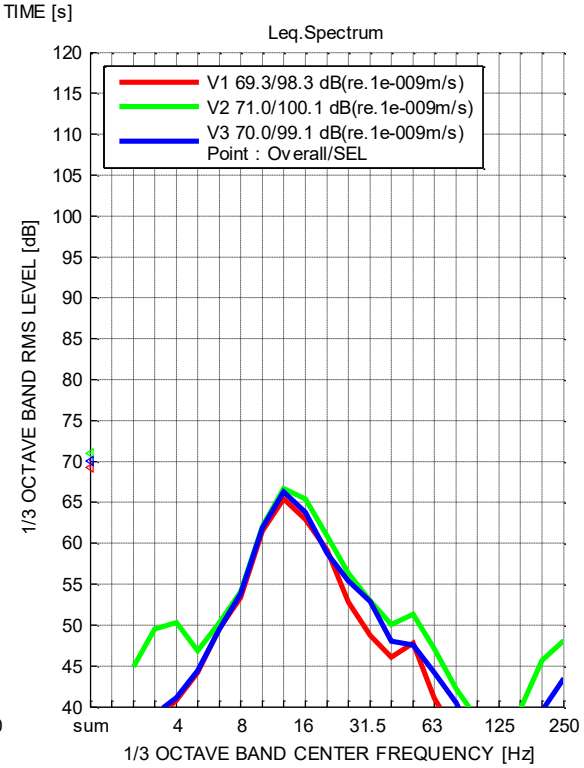
PROJECT: Tram rapide Esch SECTION: P5

REC: REC006_02.mat REMARQUE: Trafic sur bretelle autoroute, circulation locale

TIME: 30/09/2024 14:39:18



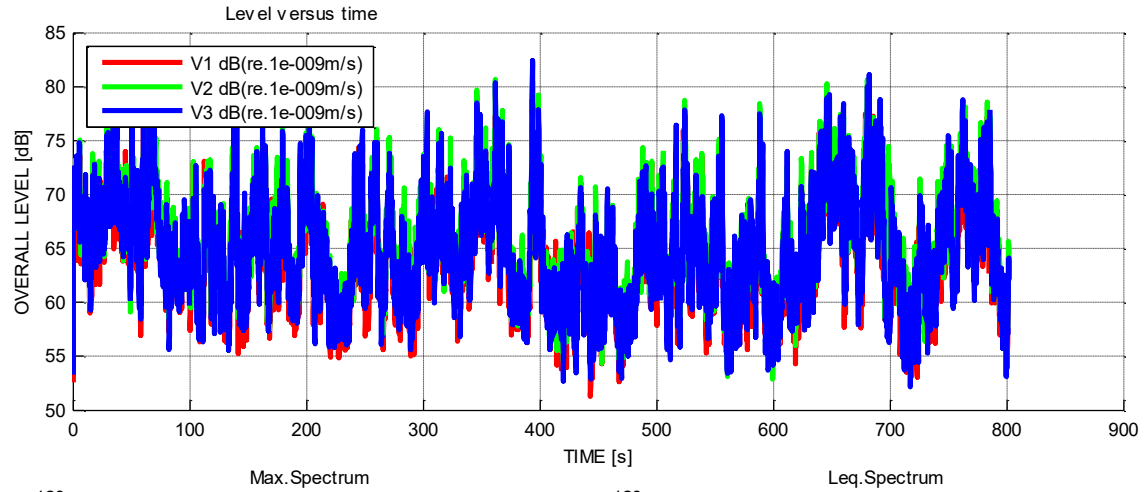


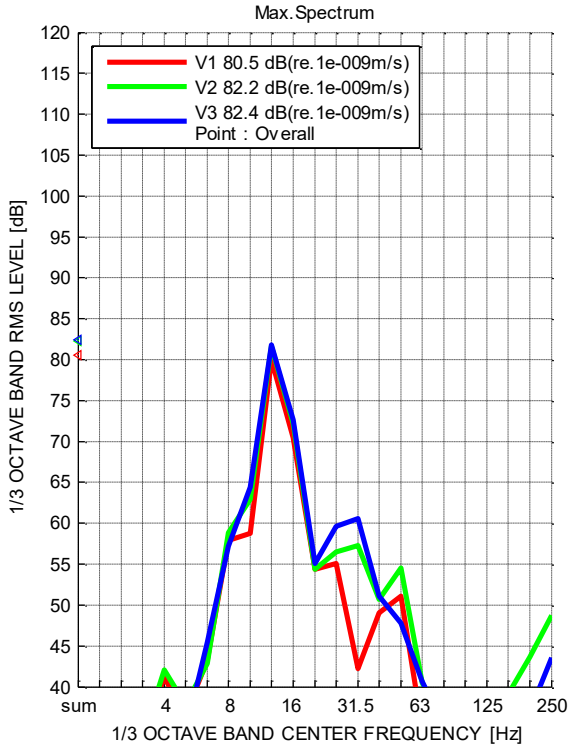


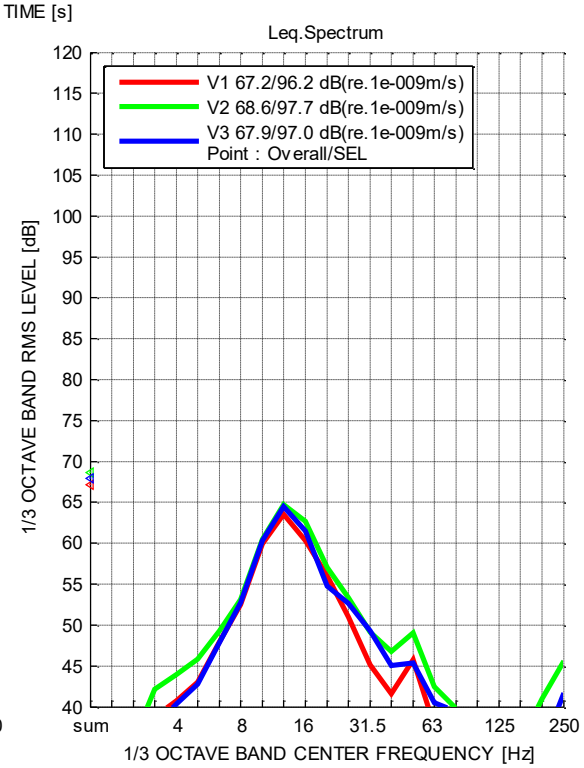
PROJECT: Tram rapide Esch SECTION: P5

REC: REC006_03.mat REMARQUE: Trafic sur bretelle autoroute, circulation locale

TIME: 30/09/2024 14:52:38

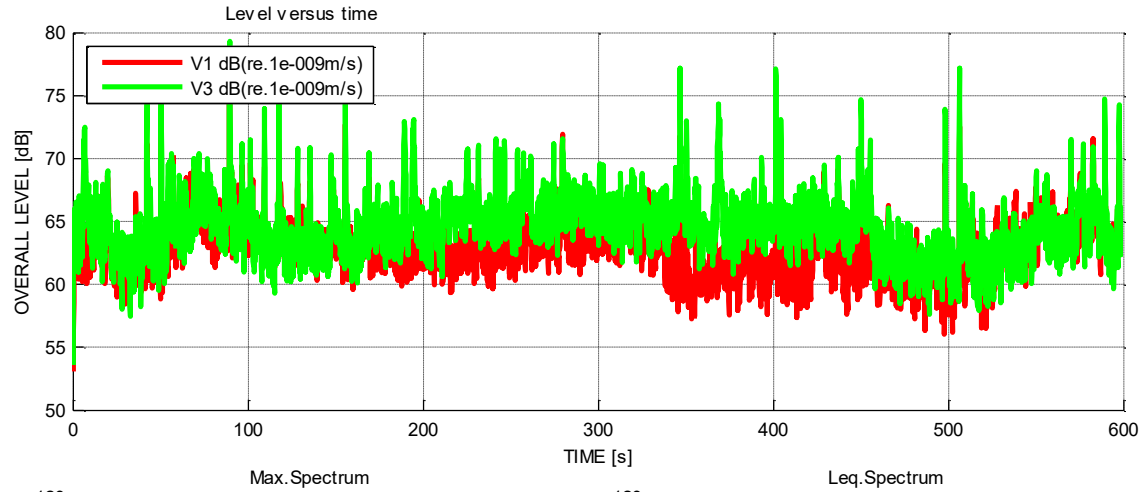


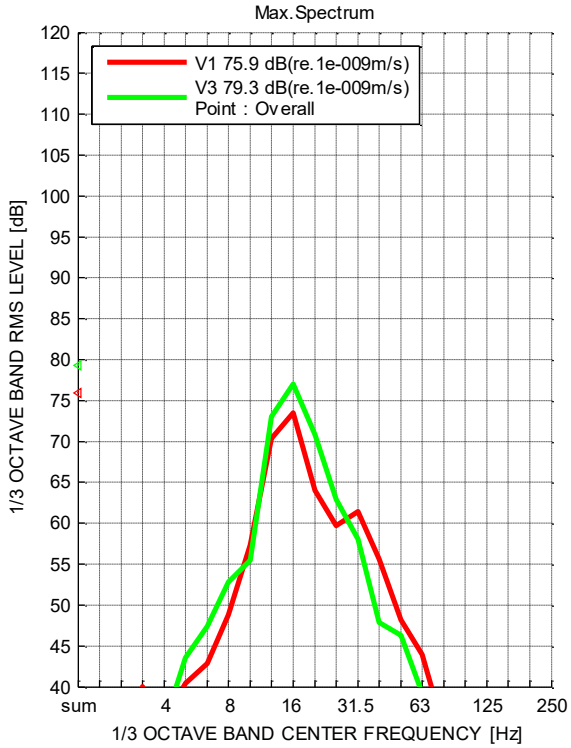


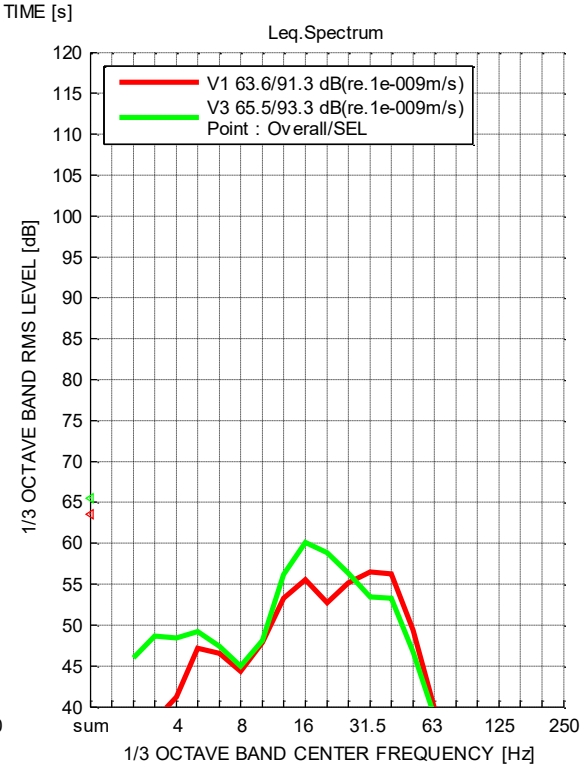


PROJECT: Tram rapide Esch
REC: REC005_01.mat
TIME: 30/09/2024 13:35:59

SECTION: P6
REMARQUE: Autoroute à 60 m: Bus, voitures, poids lourds
REMARQUE: (activités entreprises)

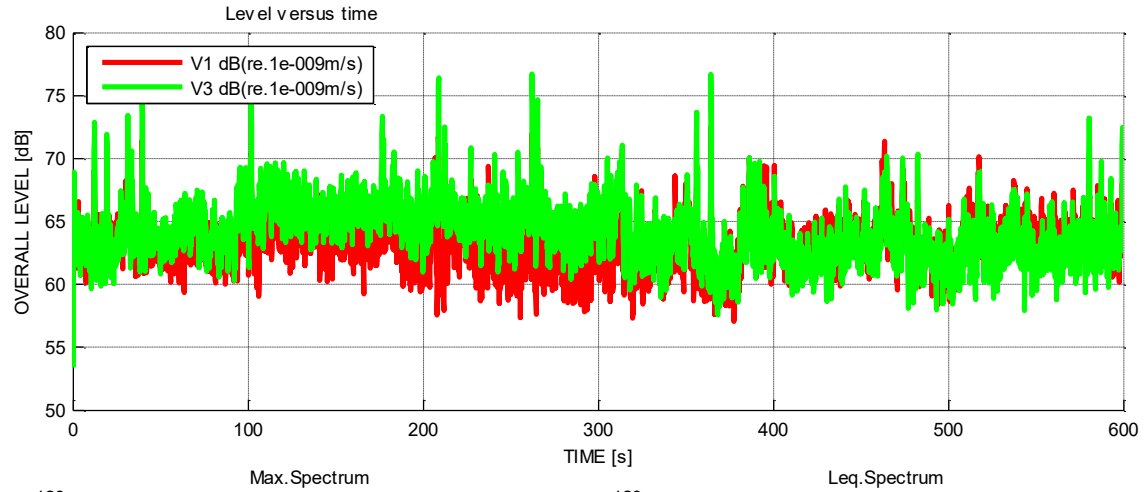


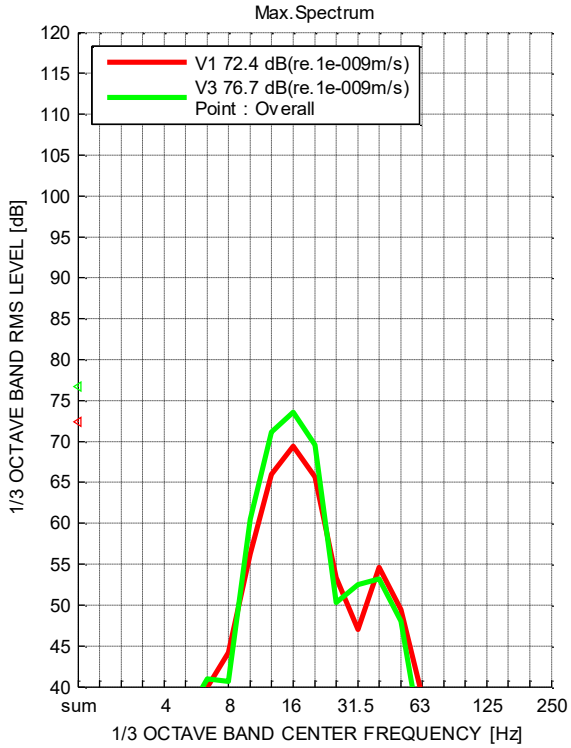


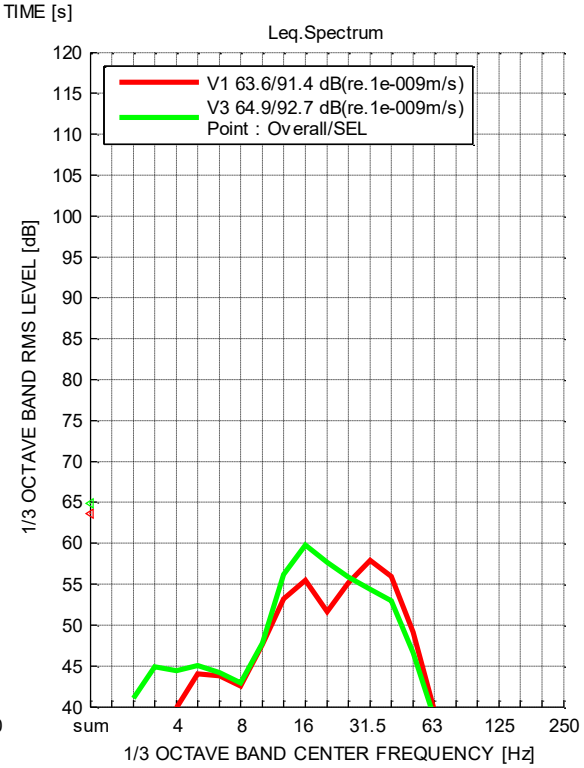


PROJECT: Tram rapide Esch
REC: REC005_02.mat
TIME: 30/09/2024 13:45:59

SECTION: P6
REMARQUE: Autoroute à 60 m: Bus, voitures, poids lourds
REMARQUE: (activités entreprises)

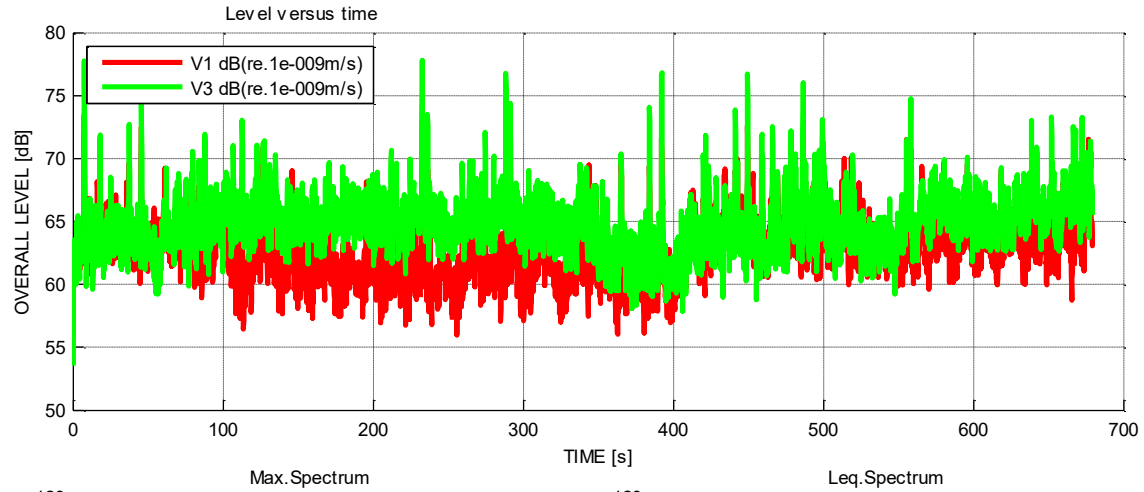


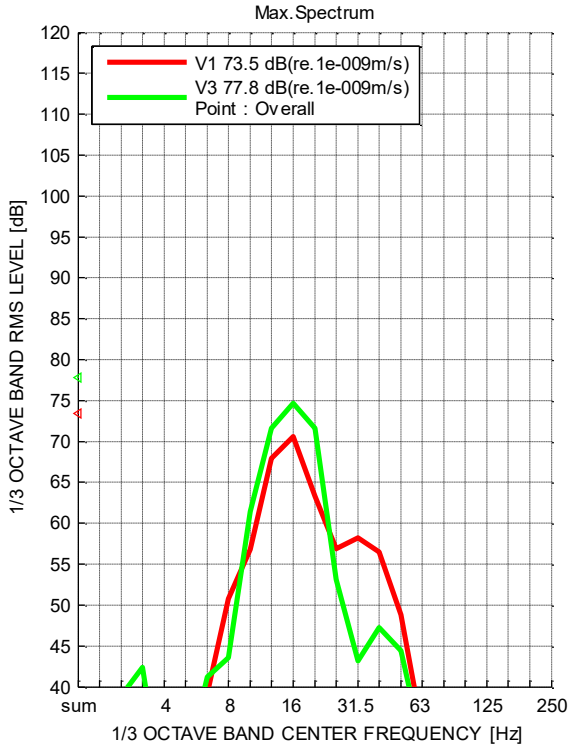


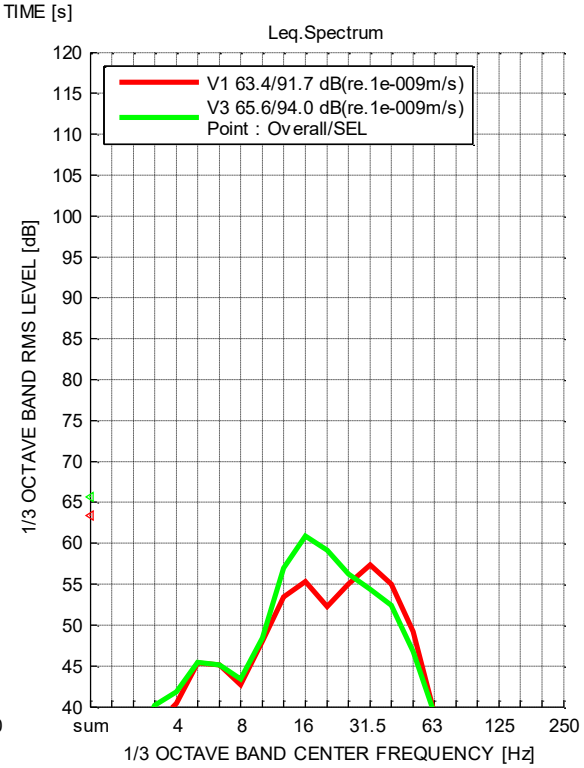


PROJECT: Tram rapide Esch
REC: REC005_03.mat
TIME: 30/09/2024 13:55:59

SECTION: P6
REMARQUE: Autoroute à 60 m: Bus, voitures, poids lourds
REMARQUE: (activités entreprises)





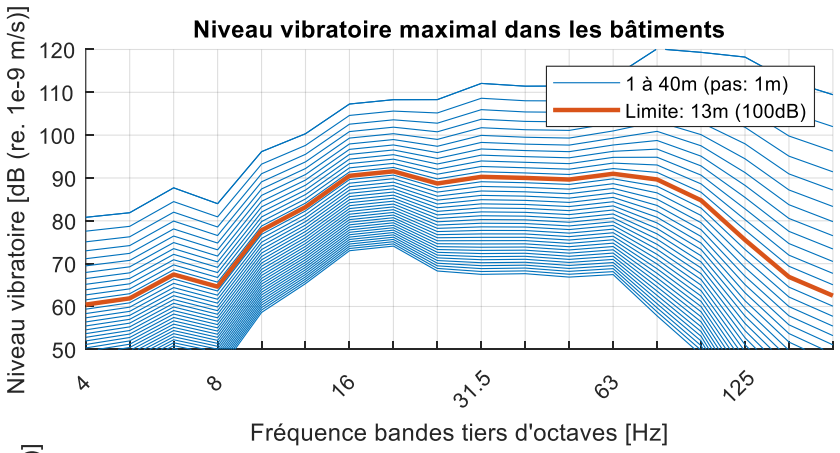


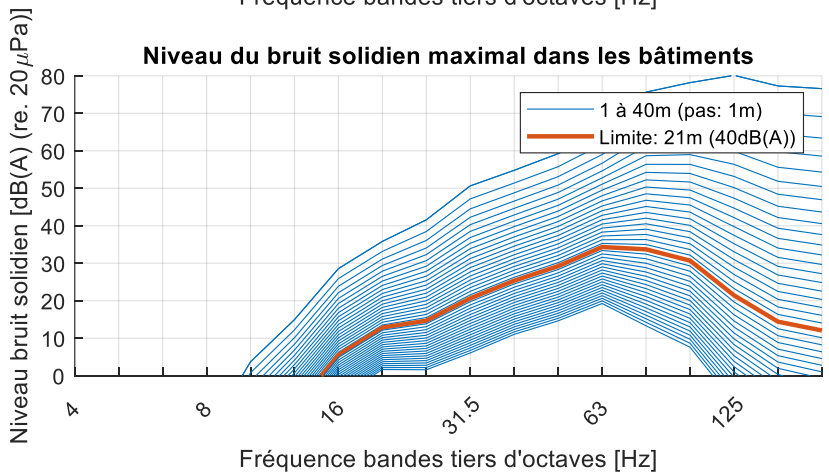
ANNEXE B – RÉSULTATS DE CALCUL « TRACÉ ANTÉRIEUR » – ZONE 4 (ZONE RÉSIDENTIELLE)

N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | 80 km/u | SSC typique

S1

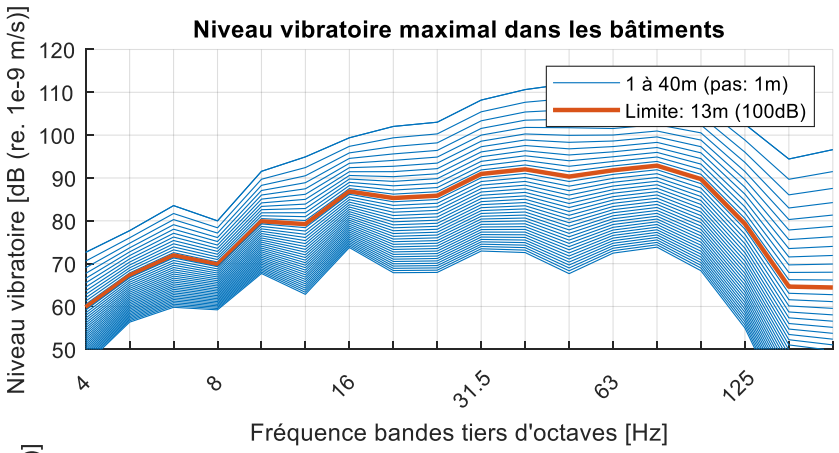


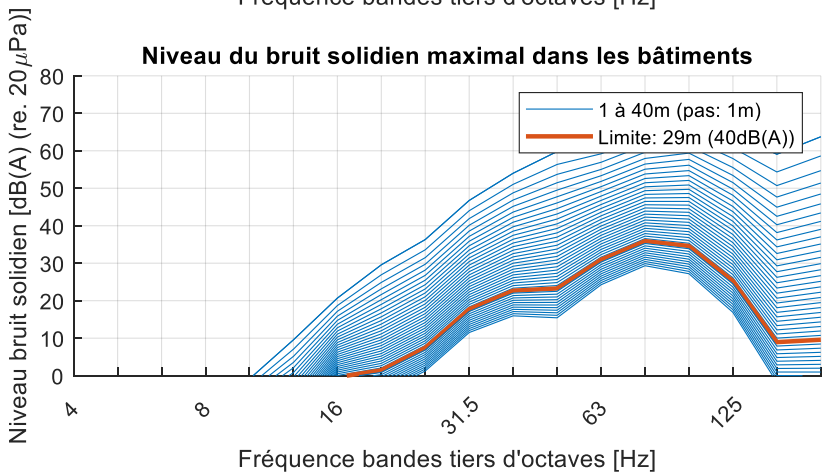


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | 80 km/u | SSC typique

S2

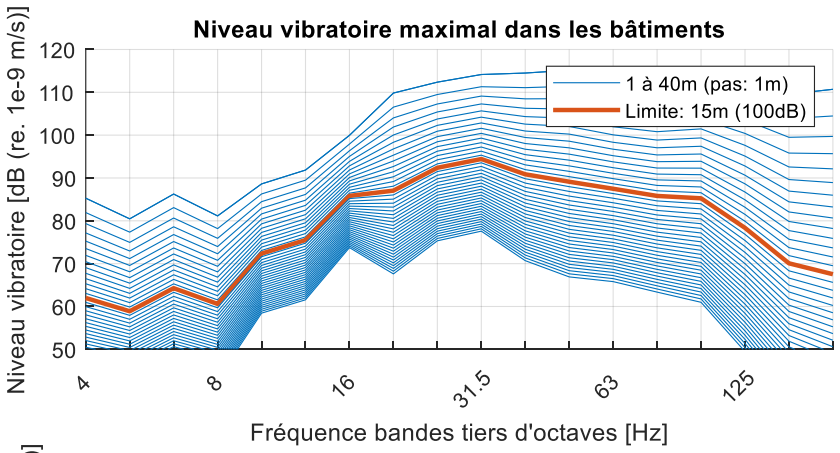


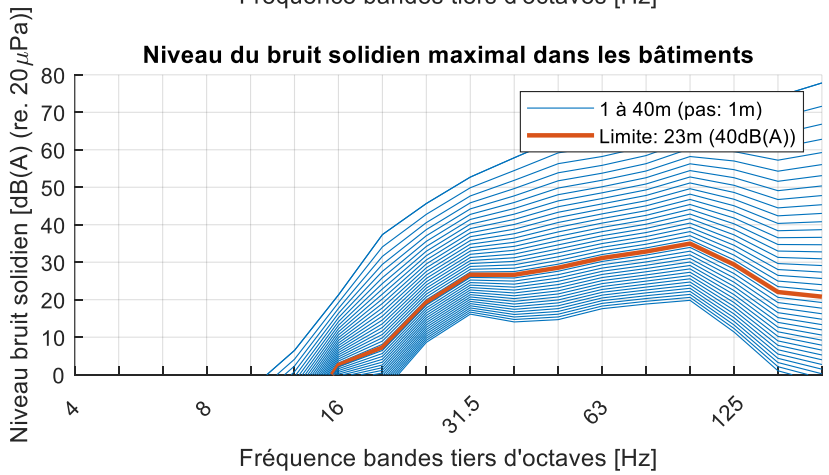


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | 80 km/u | SSC typique

S3

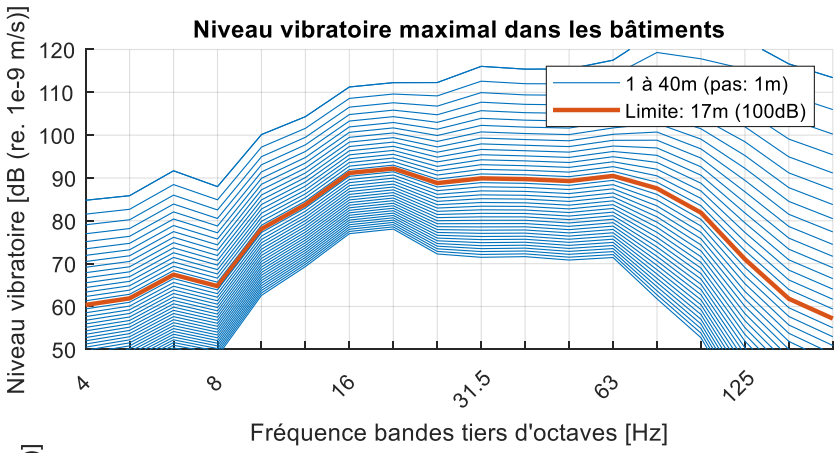


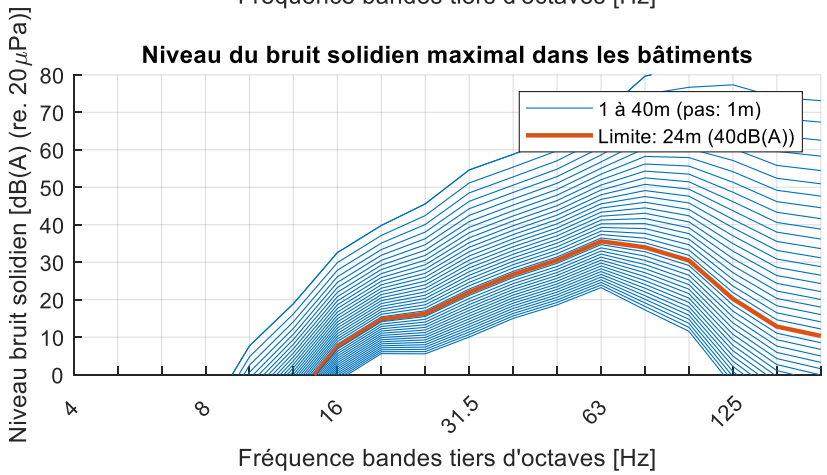


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | Pose classique + App. de voie | 40 km/u | SSC typique

S1

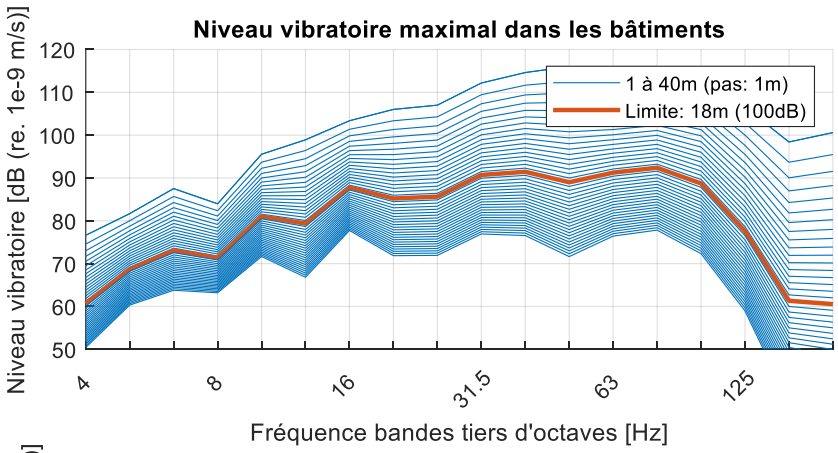


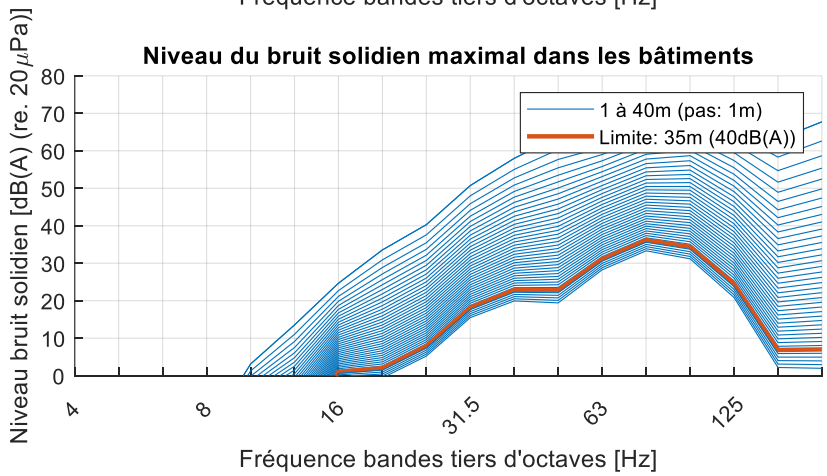


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | Pose classique + App. de voie | 40 km/u | SSC typique

S2

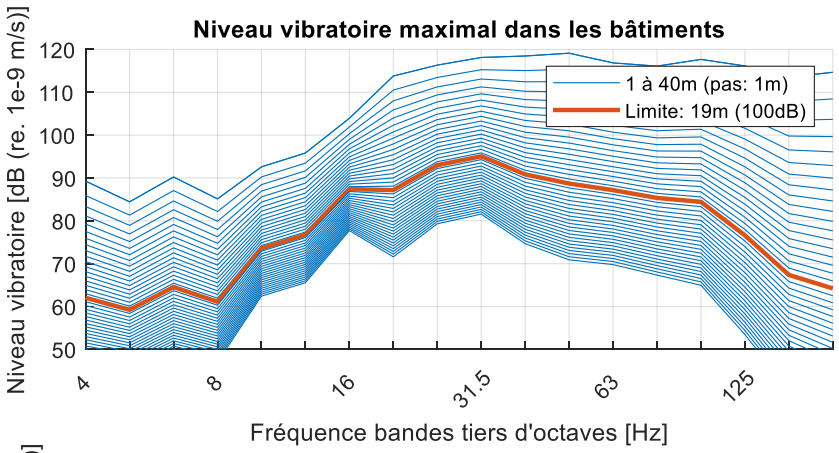


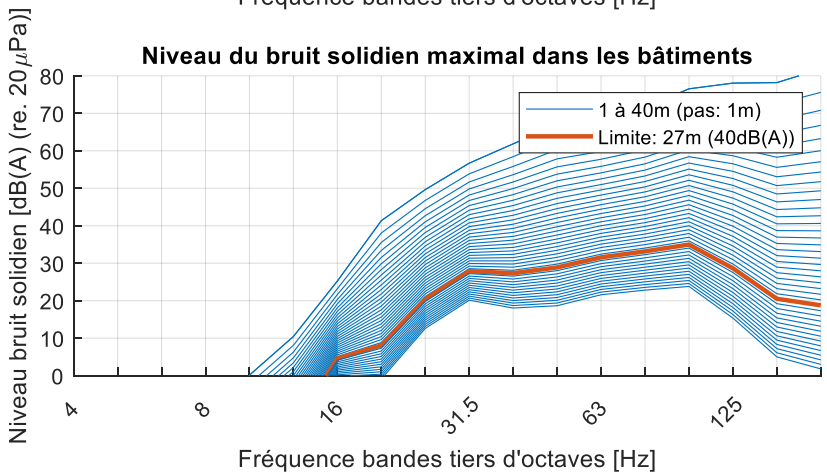


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | Pose classique + App. de voie | 40 km/u | SSC typique

S3

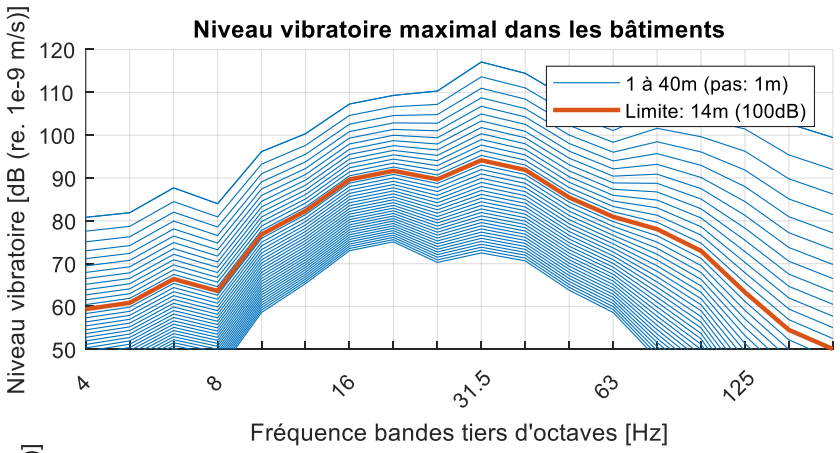


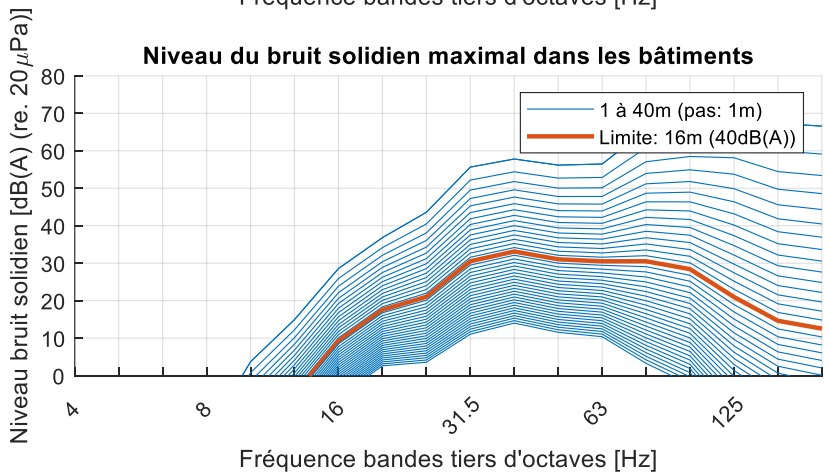


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | -8dB | 80 km/u | SSC typique

S1

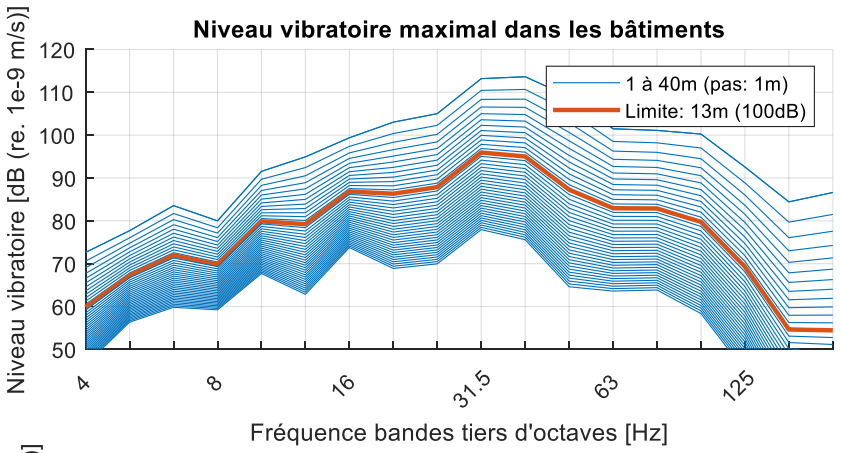


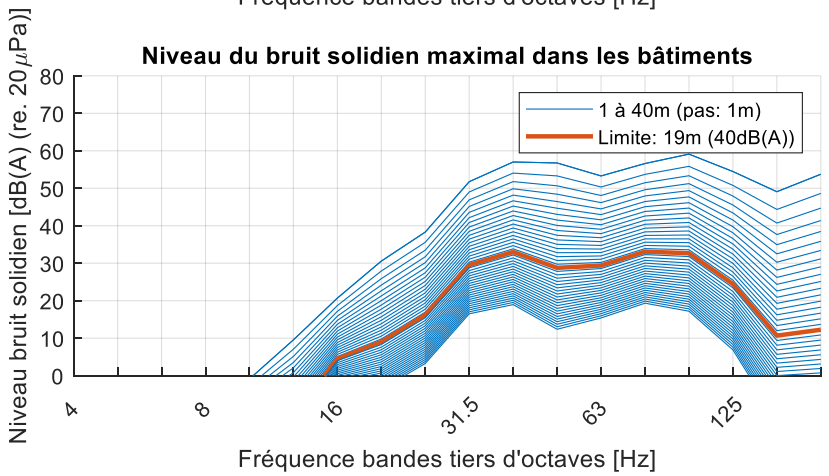


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | -8dB | 80 km/u | SSC typique

S2

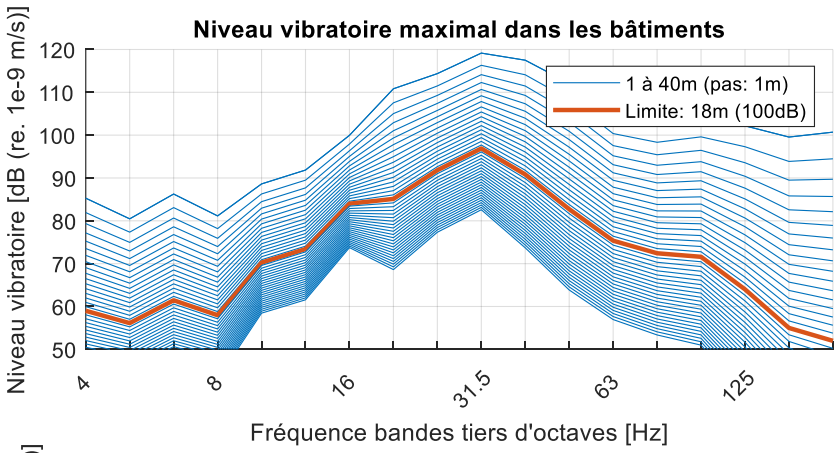


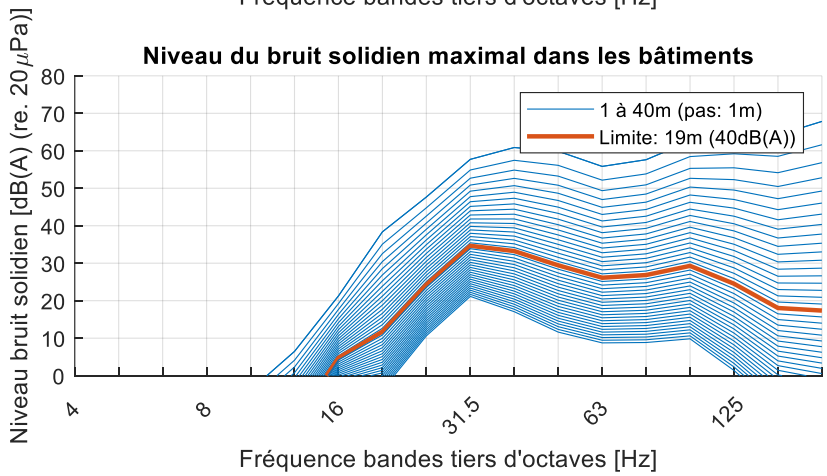


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | -8dB | 80 km/u | SSC typique

S3

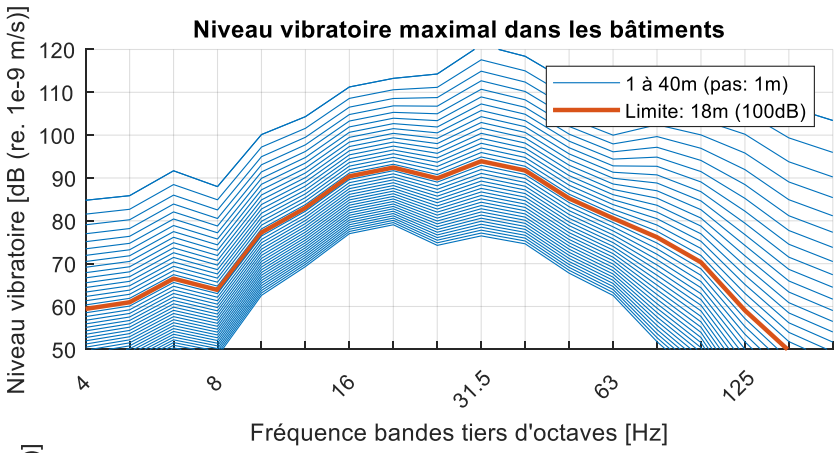


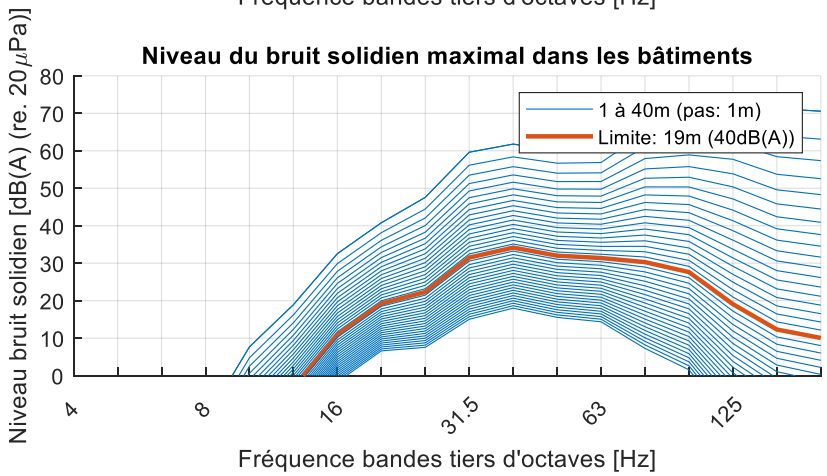


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | -8dB + App. de voie | 40 km/u | SSC typique

S1

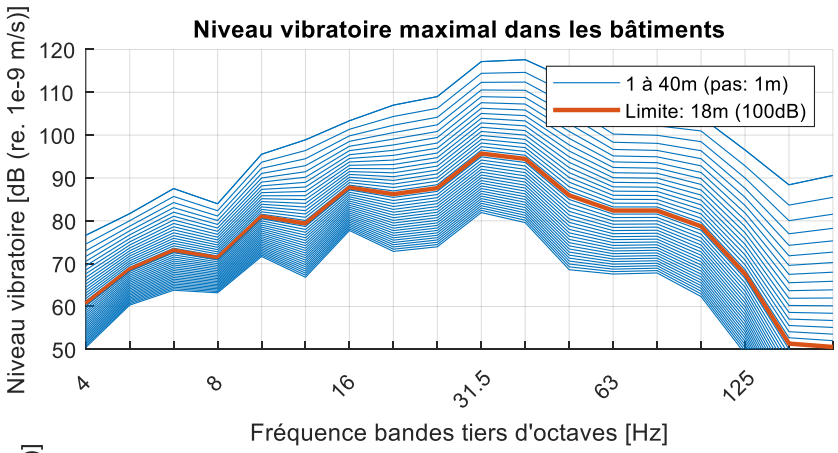


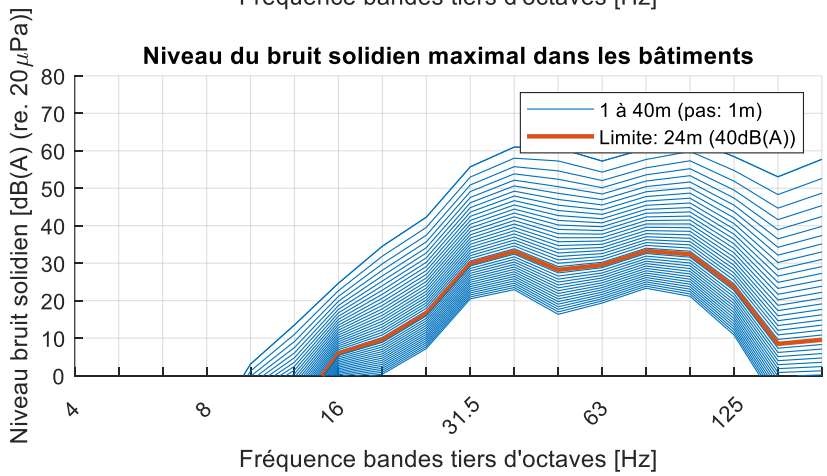


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | -8dB + App. de voie | 40 km/u | SSC typique

S2

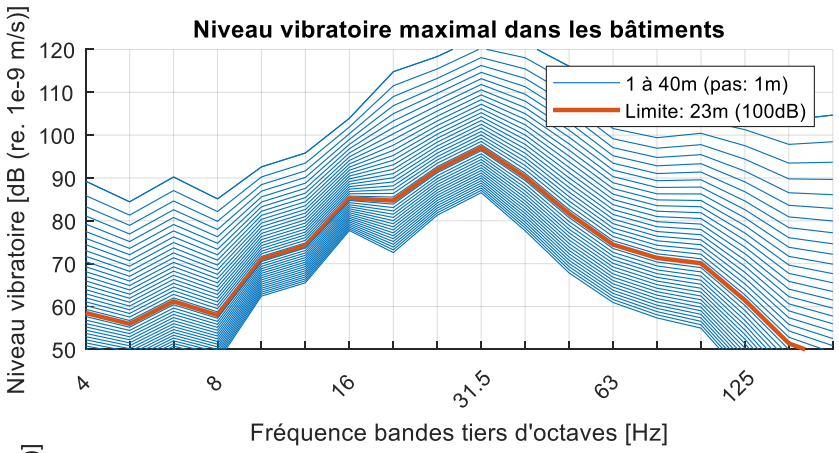


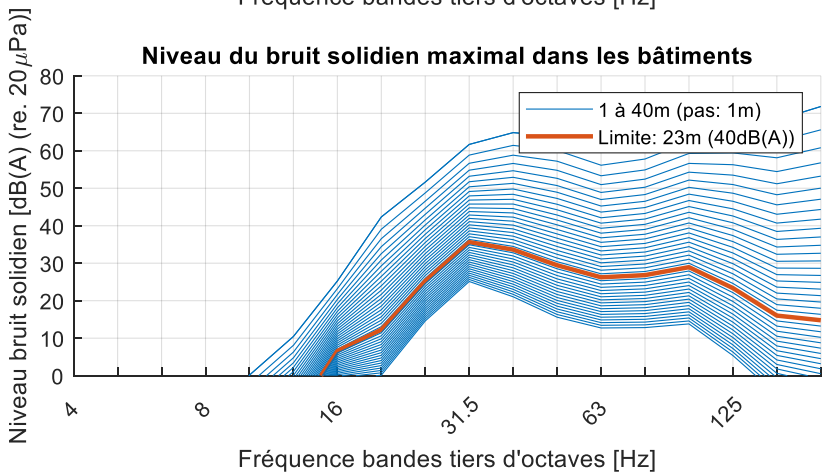


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | -8dB + App. de voie | 40 km/u | SSC typique

S3

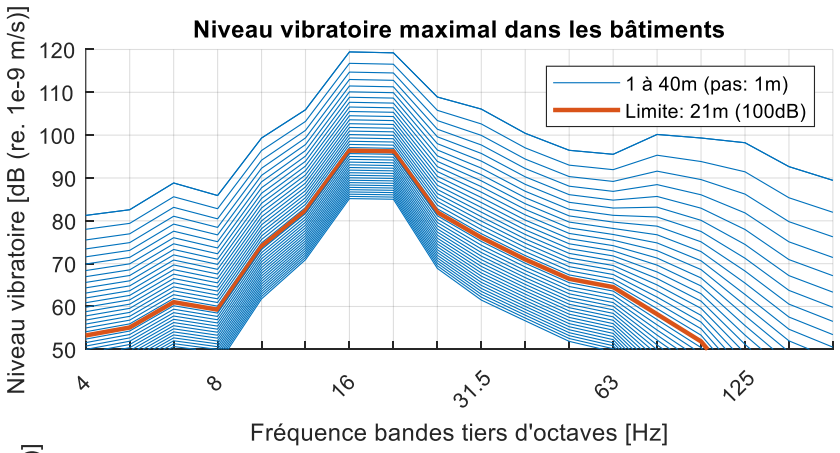


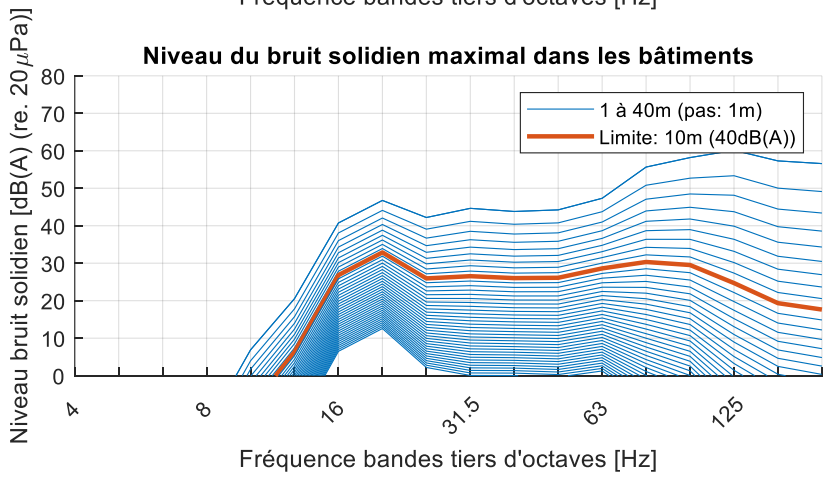


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | -16dB | 80 km/u | SSC typique

S1

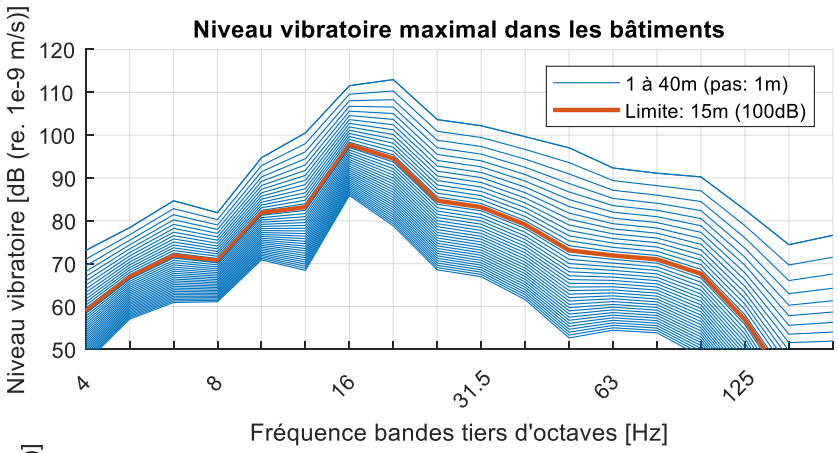


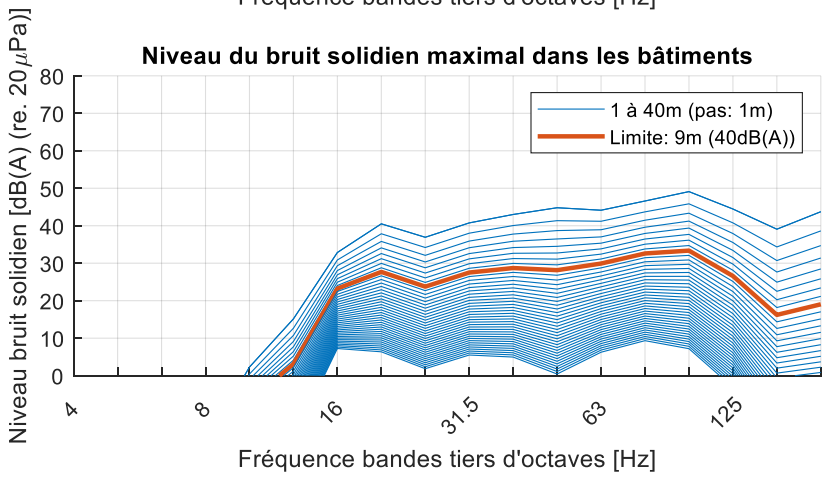


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | -16dB | 80 km/u | SSC typique

S2

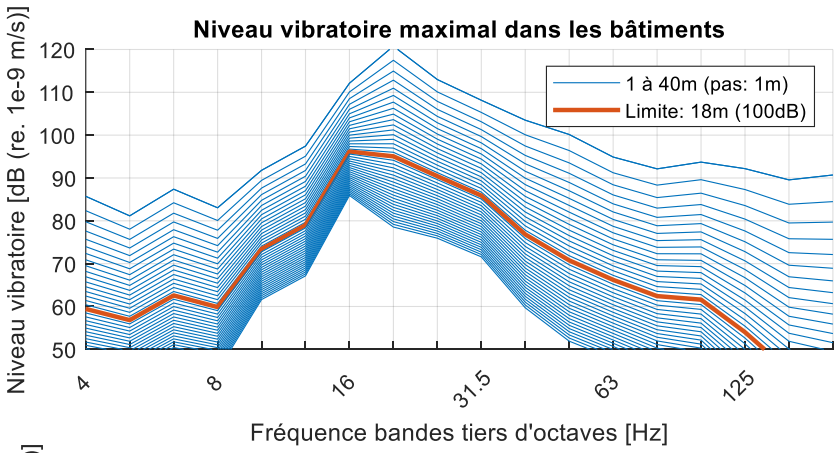


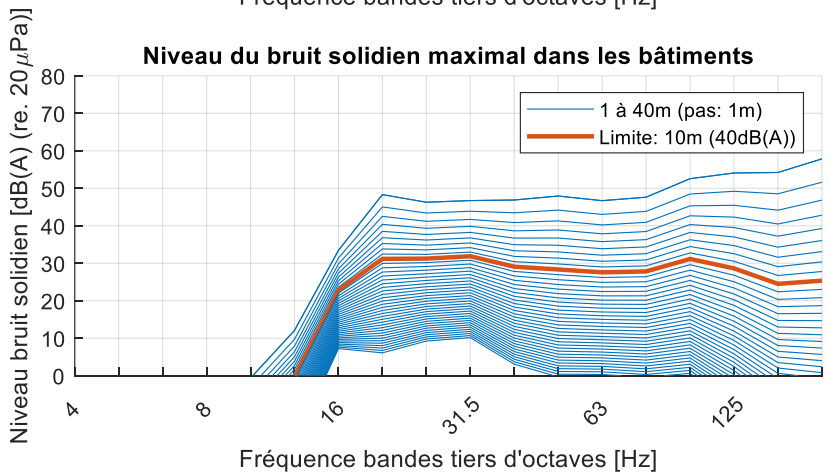


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | -16dB | 80 km/u | SSC typique

S3

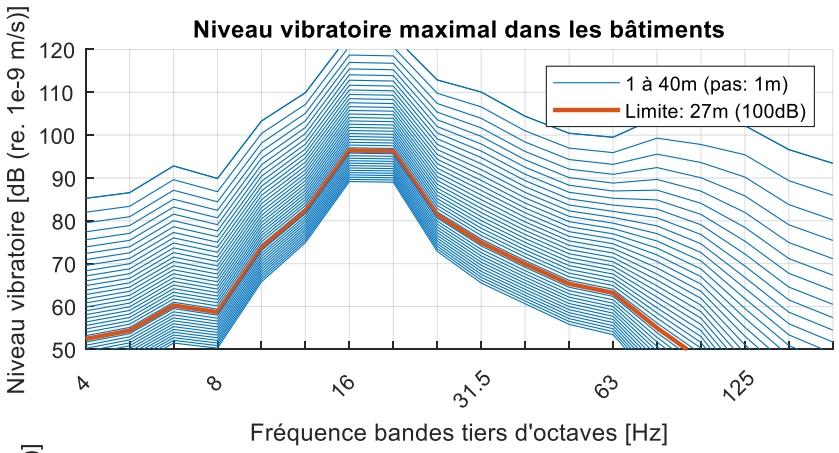


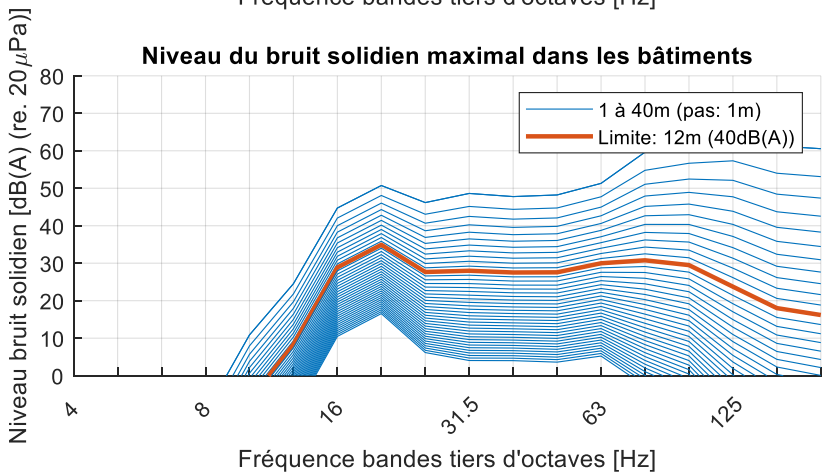


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | -16dB + App. de voie | 40 km/u | SSC typique

S1

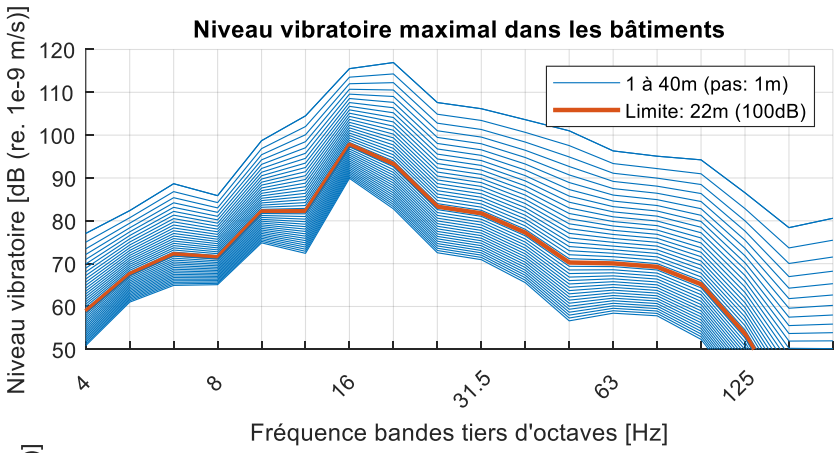


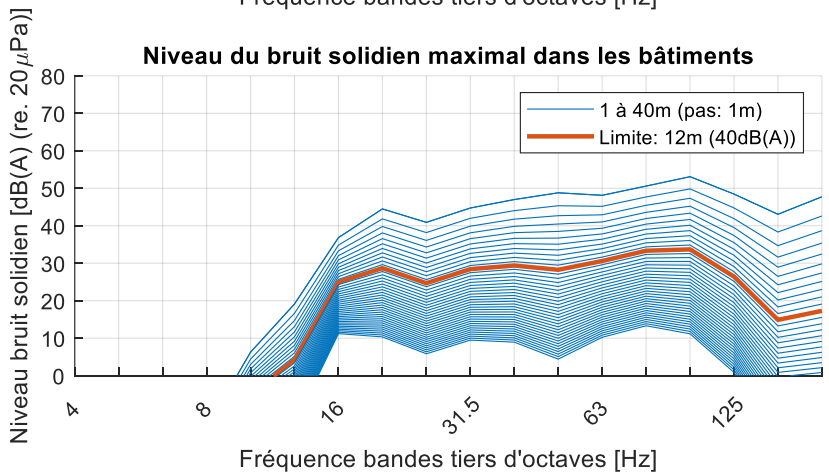


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | -16dB + App. de voie | 40 km/u | SSC typique

S2

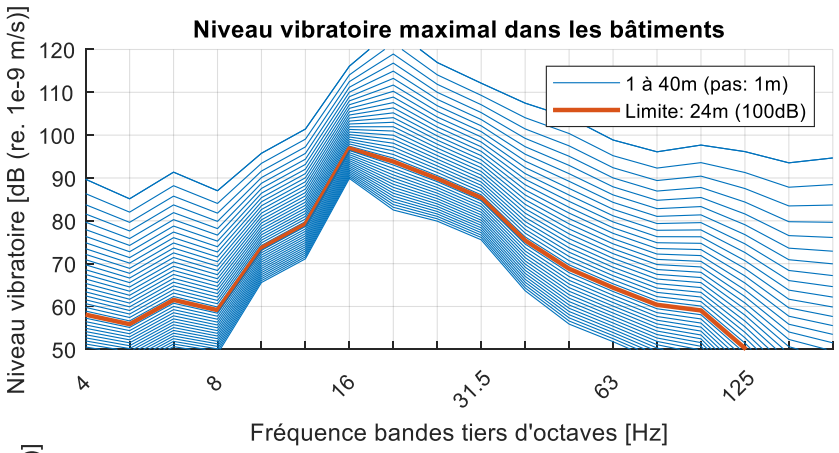


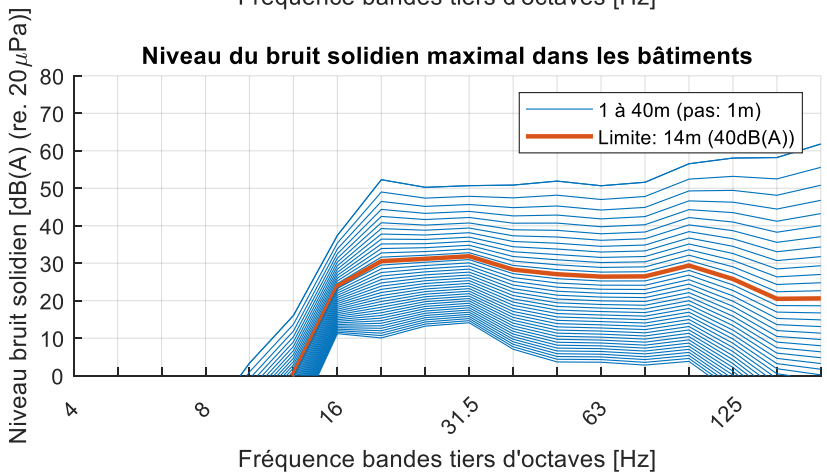


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | -16dB + App. de voie | 40 km/u | SSC typique

S3

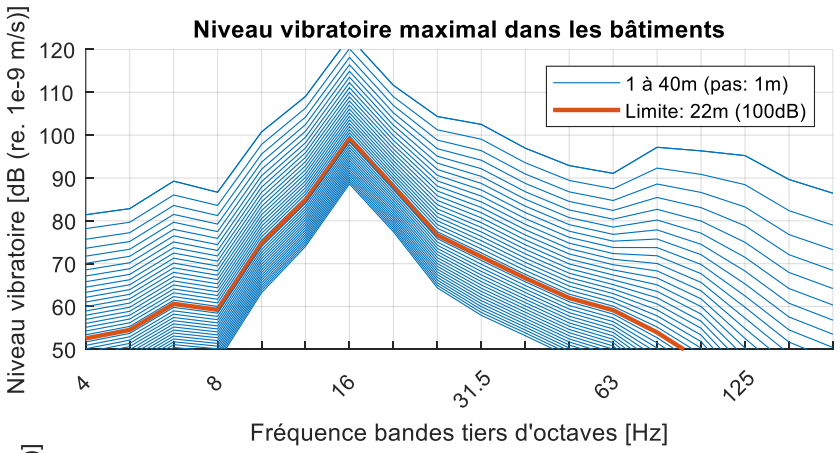


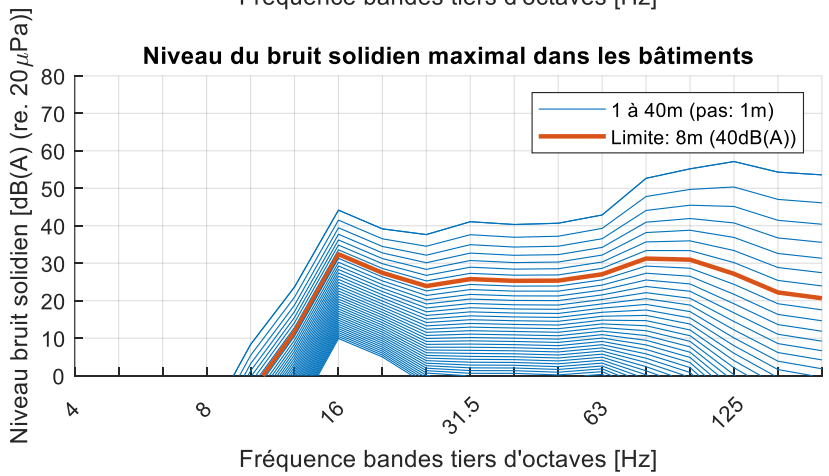


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | -20dB | 80 km/u | SSC typique

S1

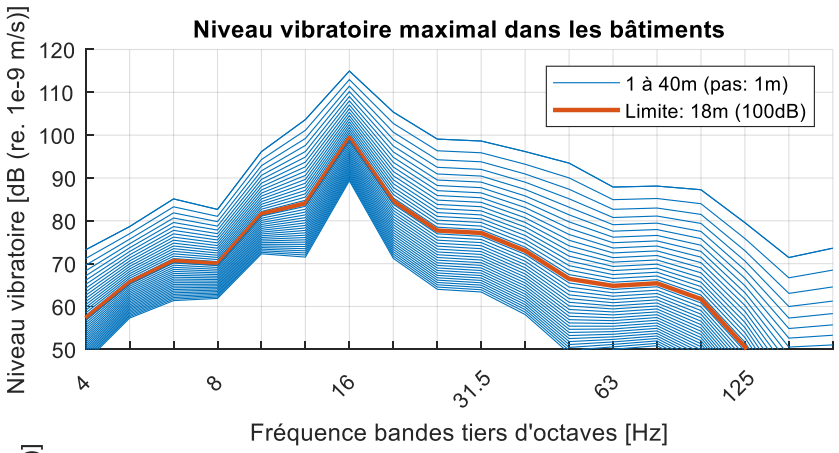


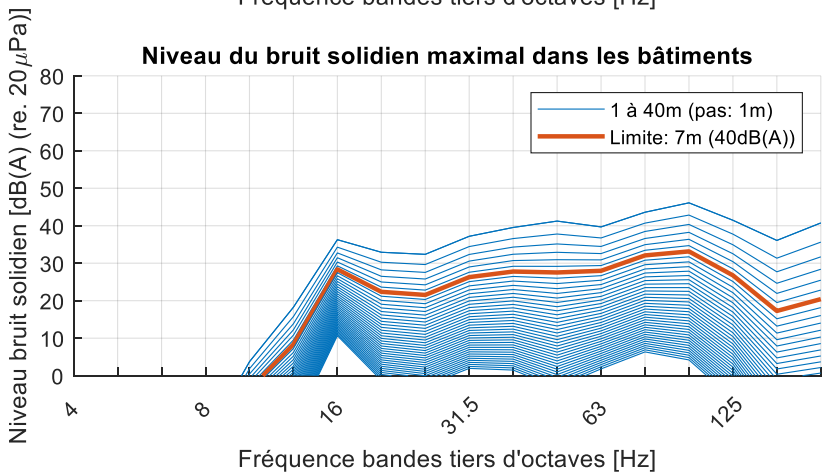


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | -20dB | 80 km/u | SSC typique

S2

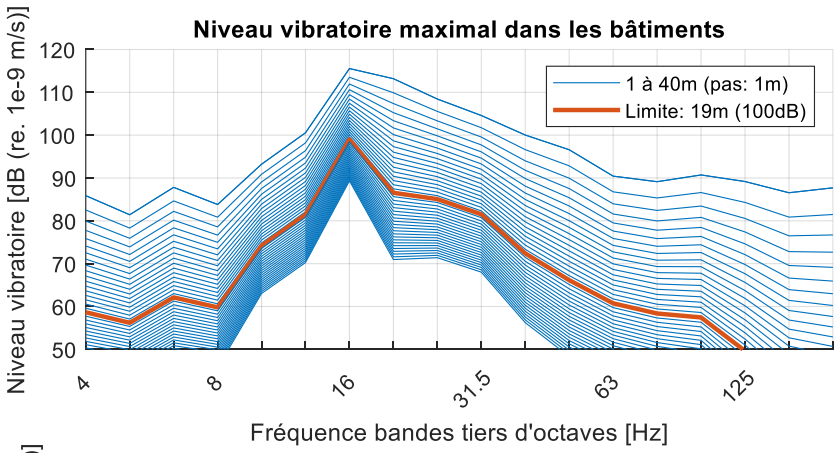


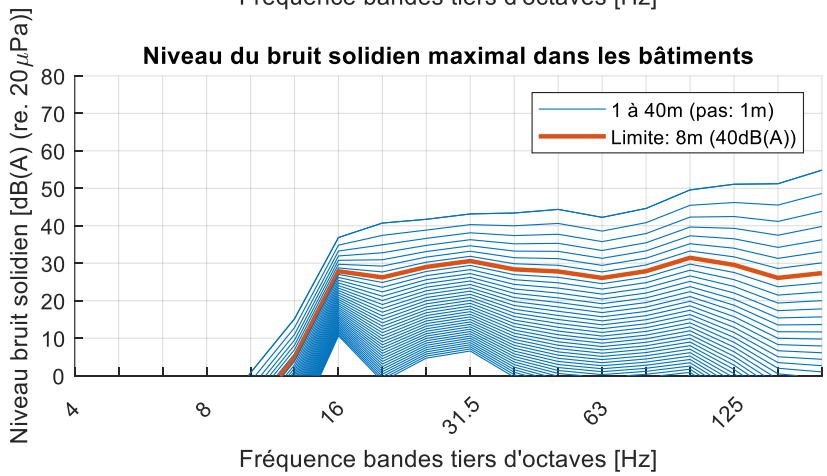


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | -20dB | 80 km/u | SSC typique

S3

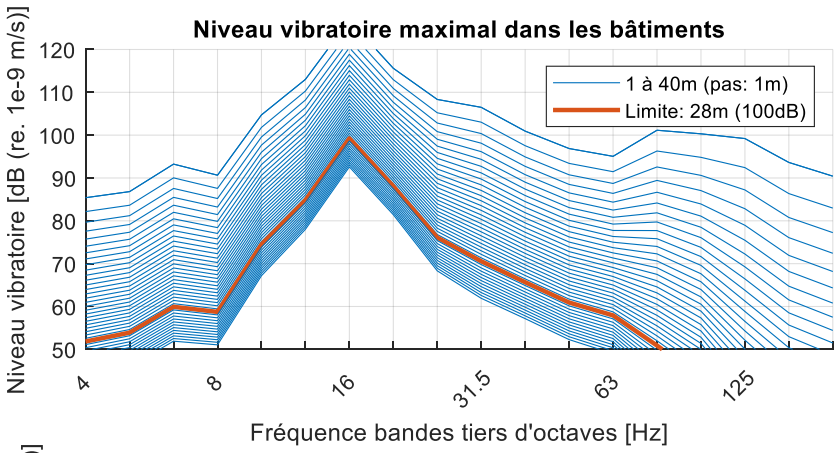


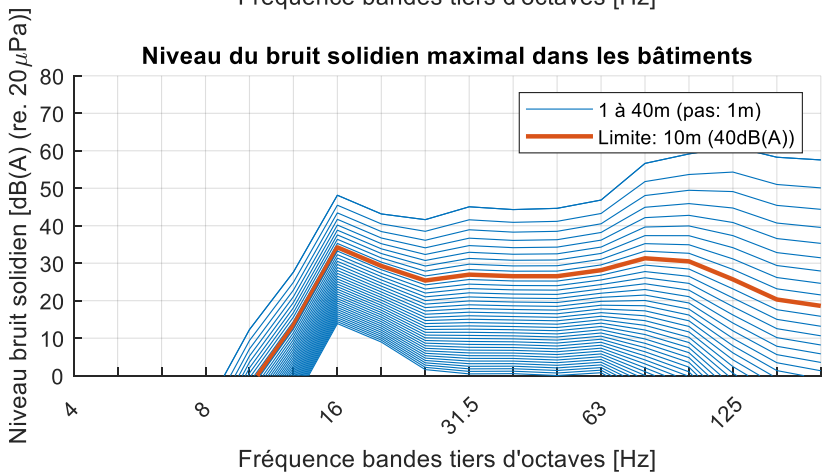


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | -20dB + App. de voie | 40 km/u | SSC typique

S1

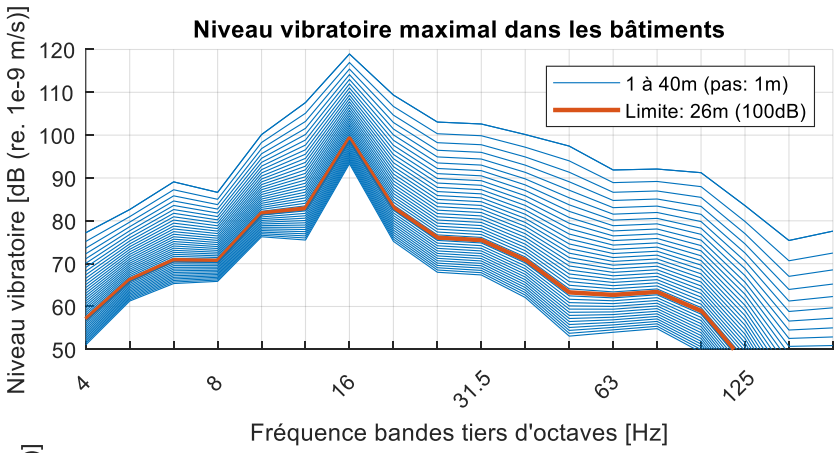


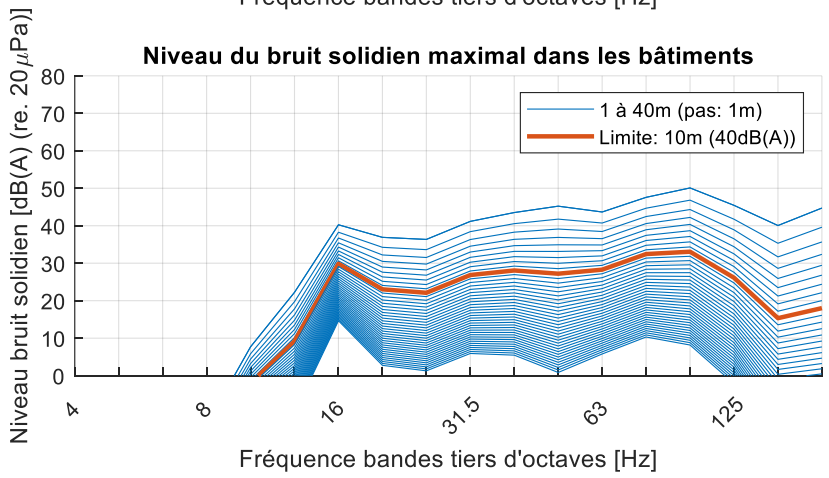


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | -20dB + App. de voie | 40 km/u | SSC typique

S2

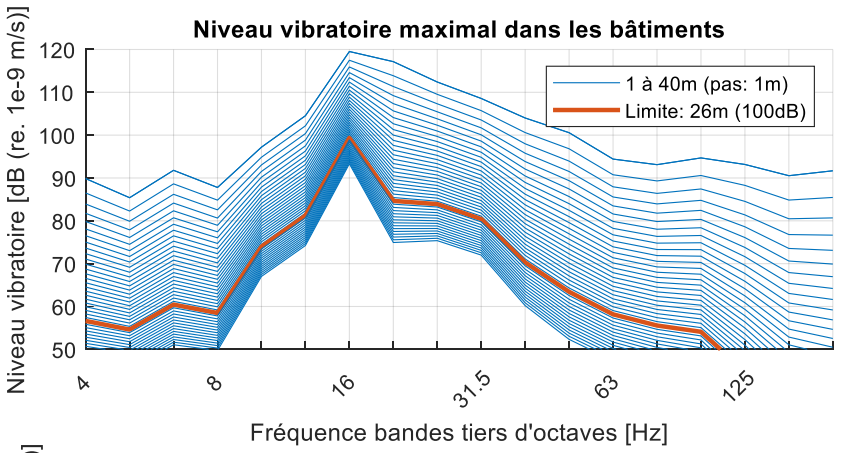


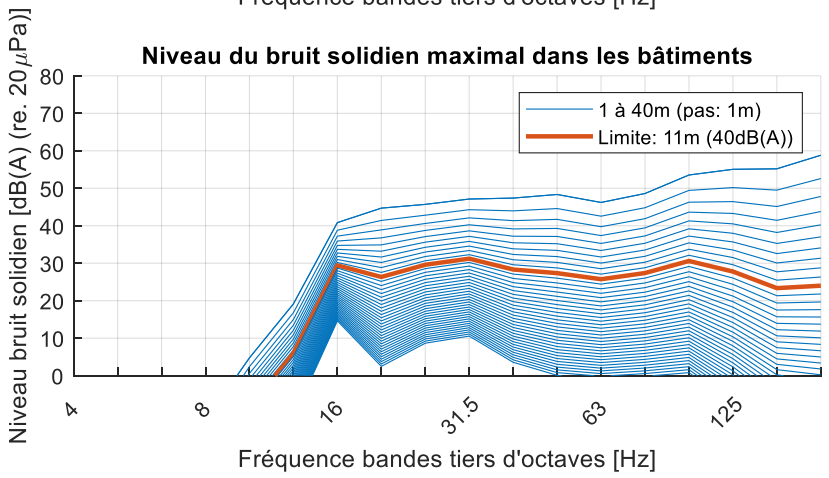


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | -20dB + App. de voie | 40 km/u | SSC typique

S3



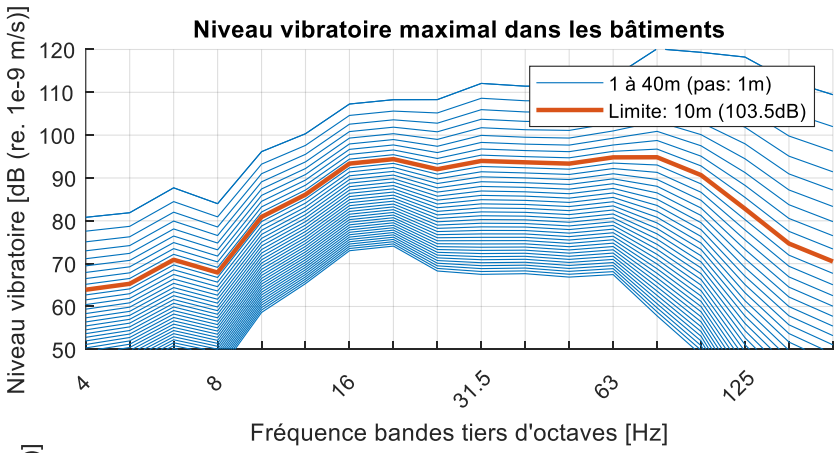


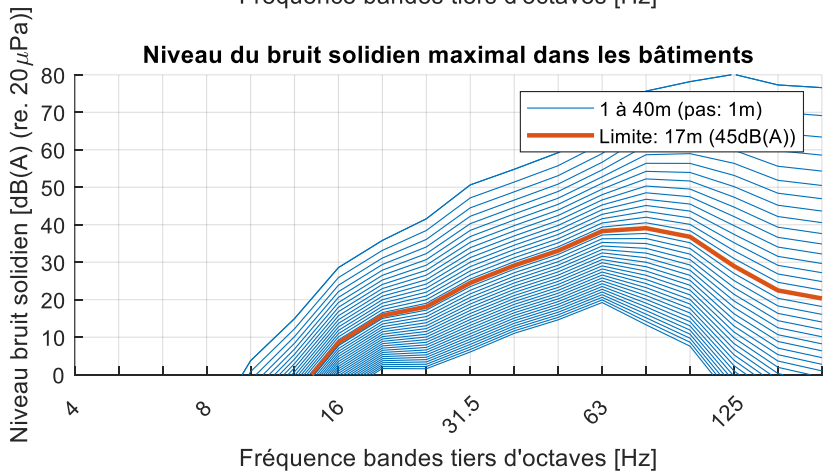
ANNEXE C – RÉSULTATS DE CALCUL « TRACÉ ANTÉRIEUR » – ZONE 3 (ZONE MIXTE)

N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | 80 km/u | SSC typique

S1

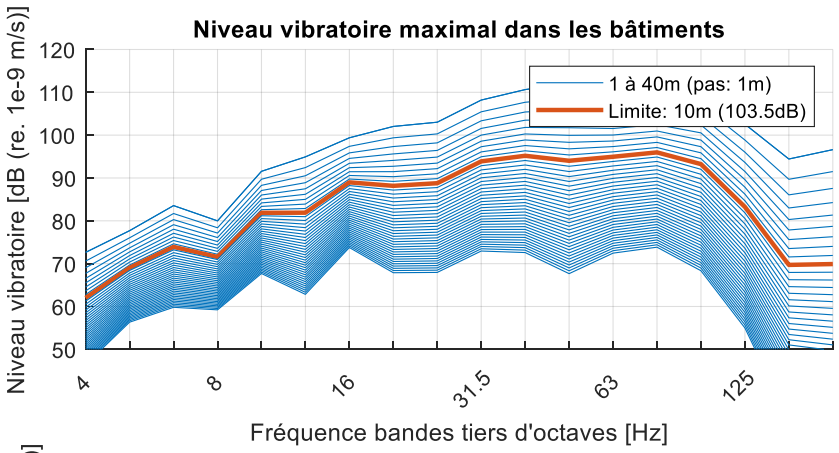


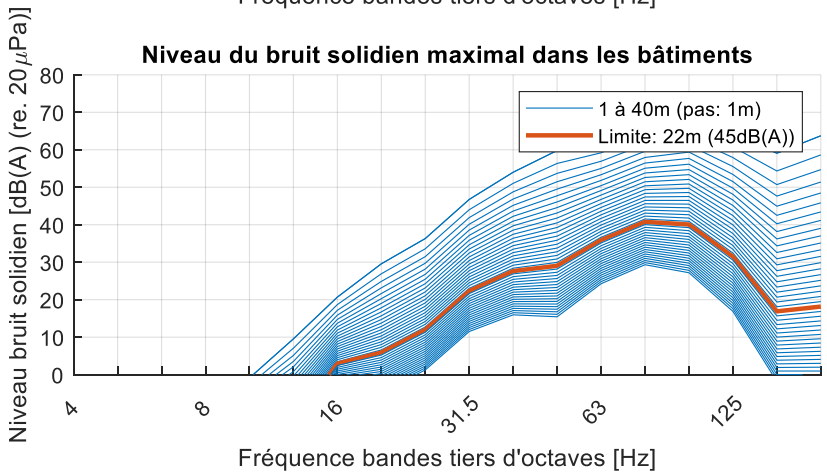


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | 80 km/u | SSC typique

S2

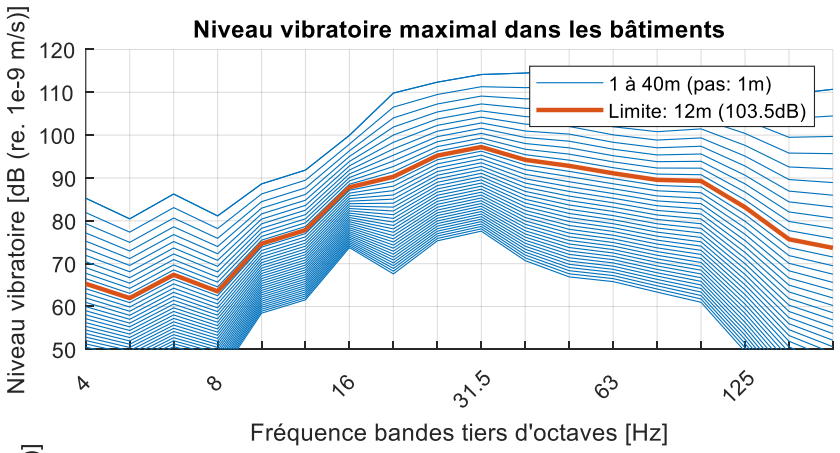


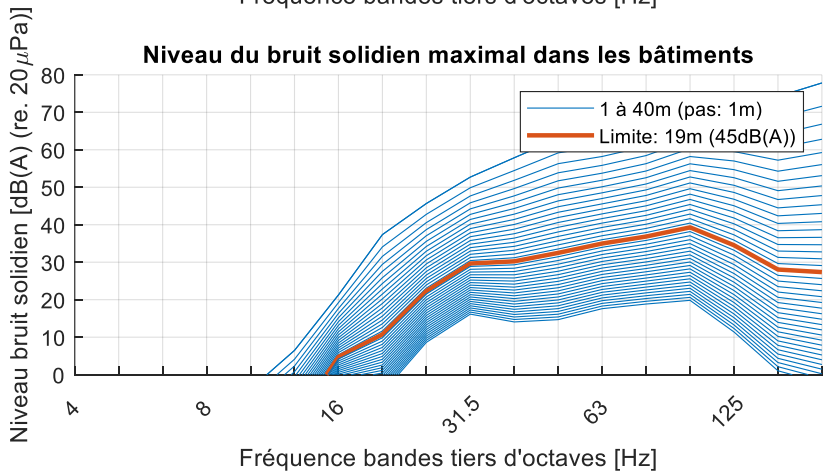


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | 80 km/u | SSC typique

S3

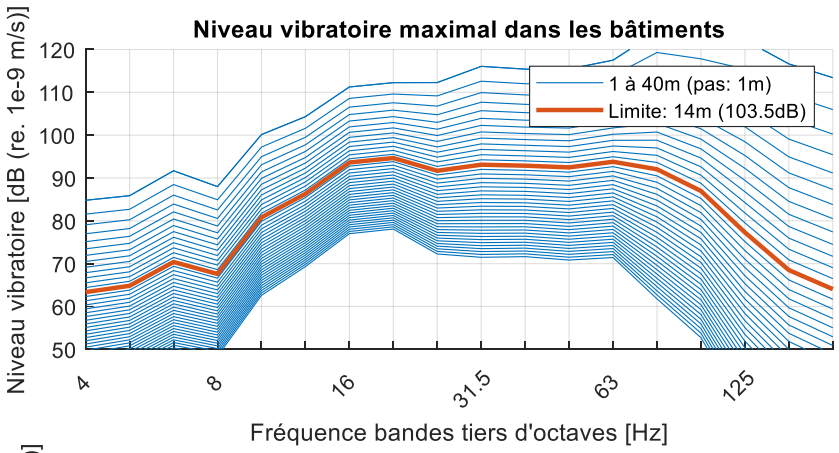


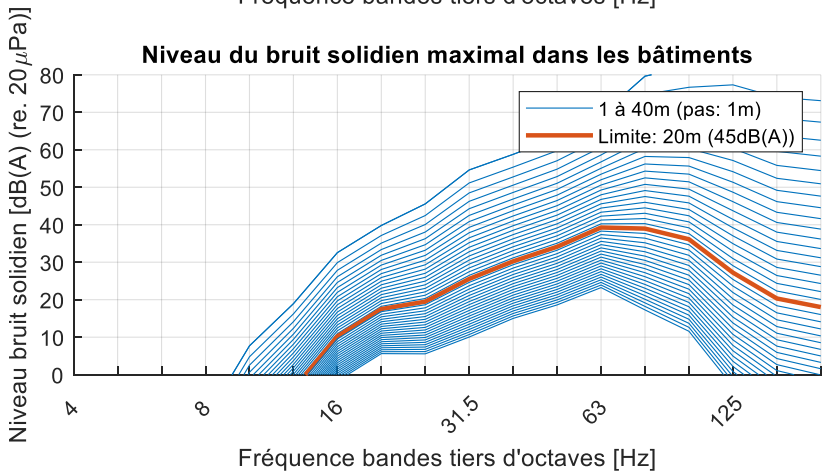


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | Pose classique + App. de voie | 40 km/u | SSC typique

S1

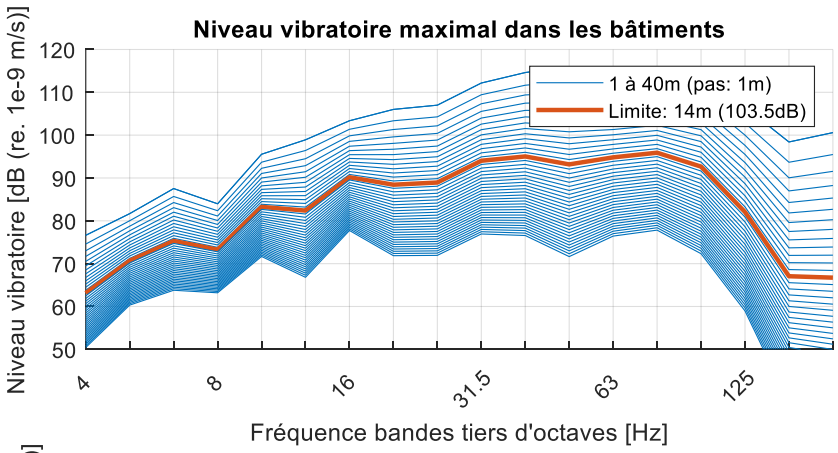


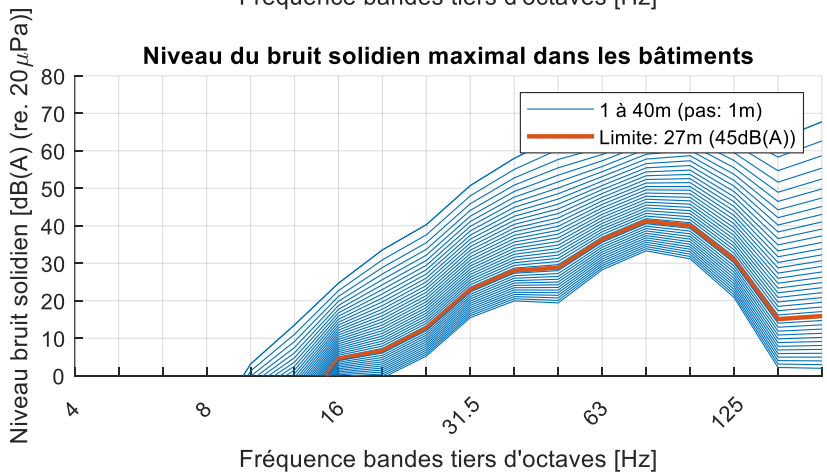


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | Pose classique + App. de voie | 40 km/u | SSC typique

S2

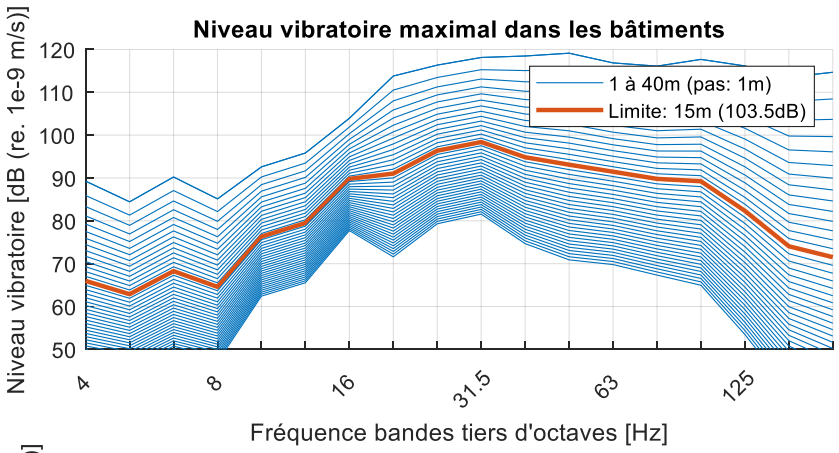


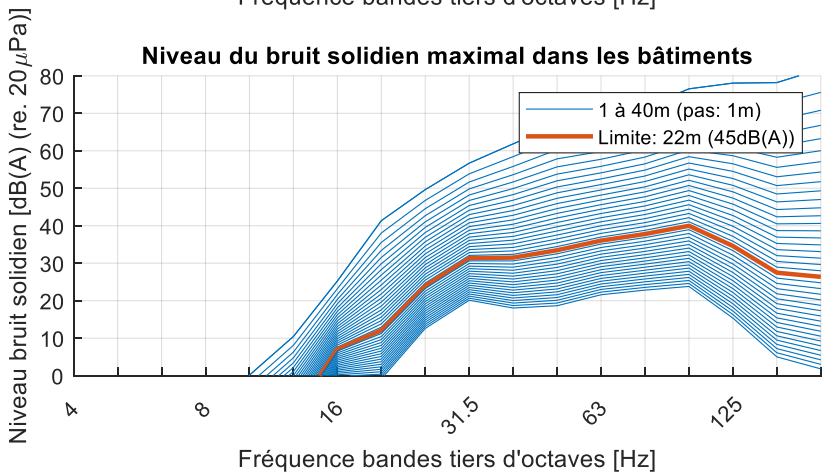


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | Pose classique + App. de voie | 40 km/u | SSC typique

S3

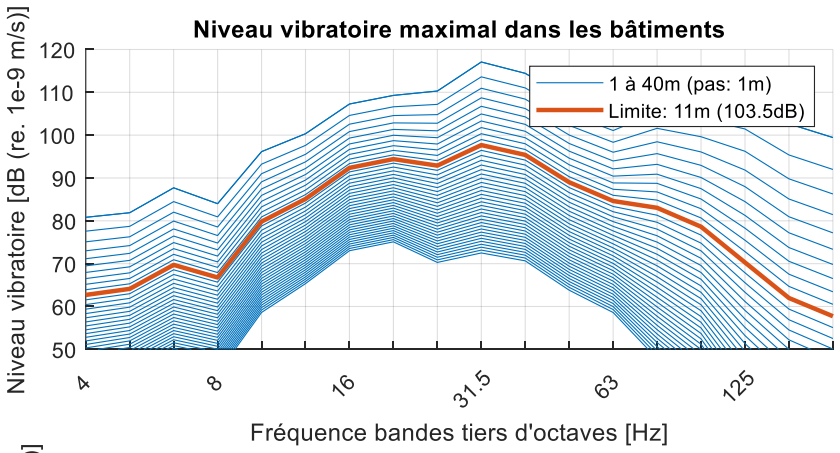


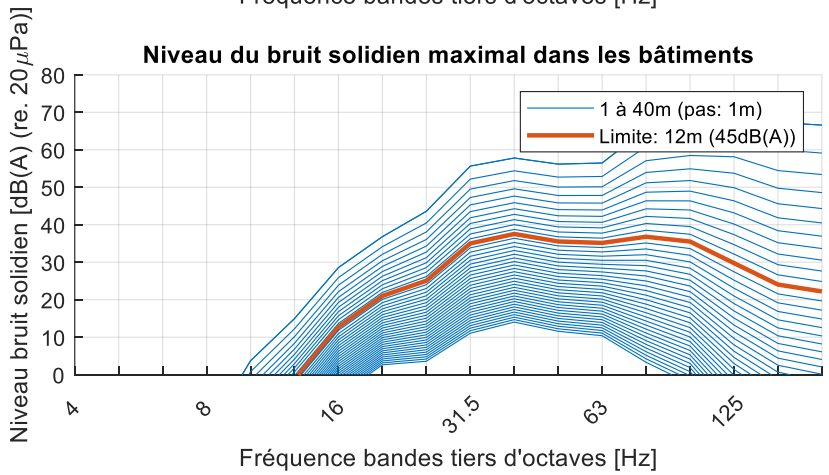


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | -8dB | 80 km/u | SSC typique

S1

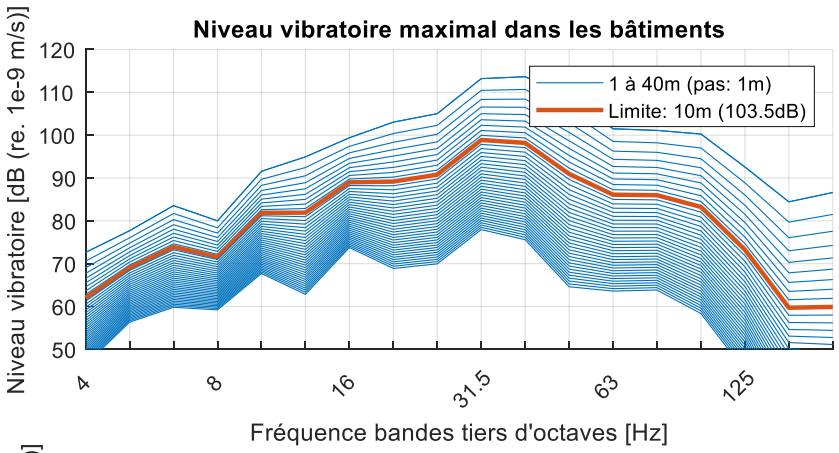


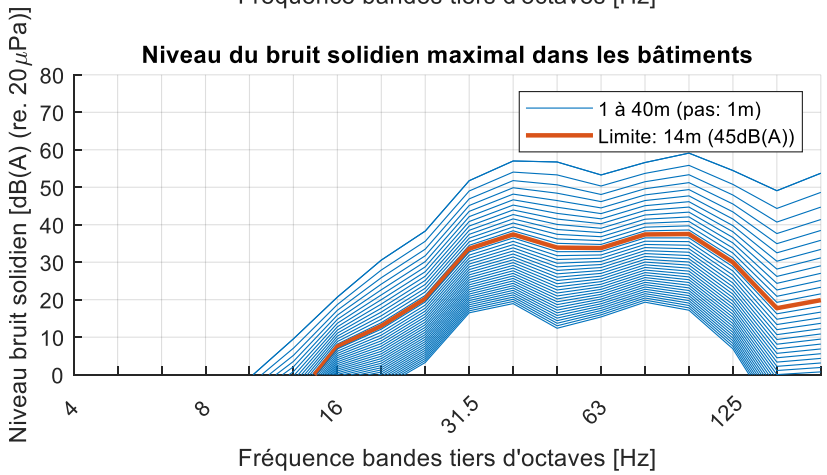


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | -8dB | 80 km/u | SSC typique

S2

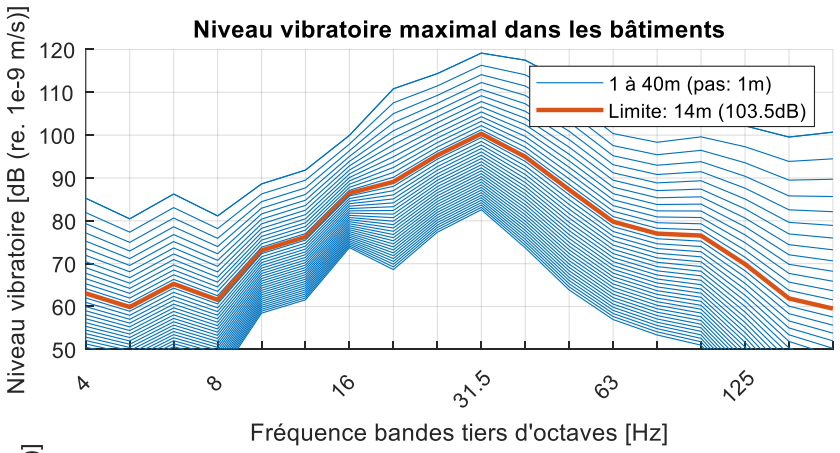


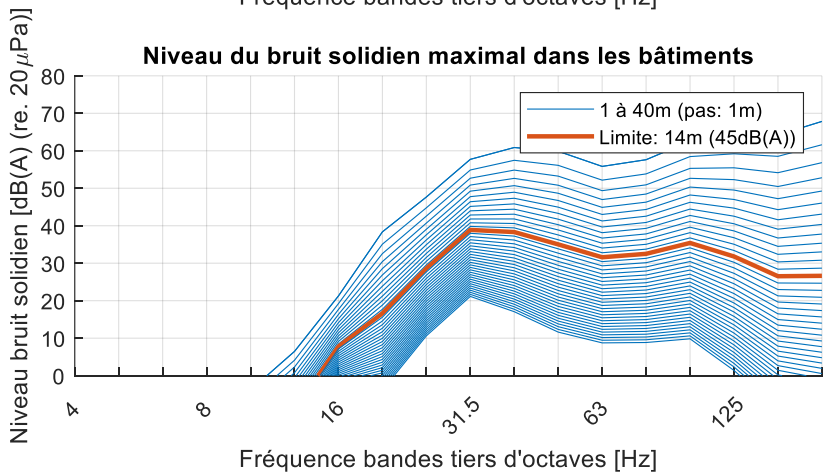


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | -8dB | 80 km/u | SSC typique

S3

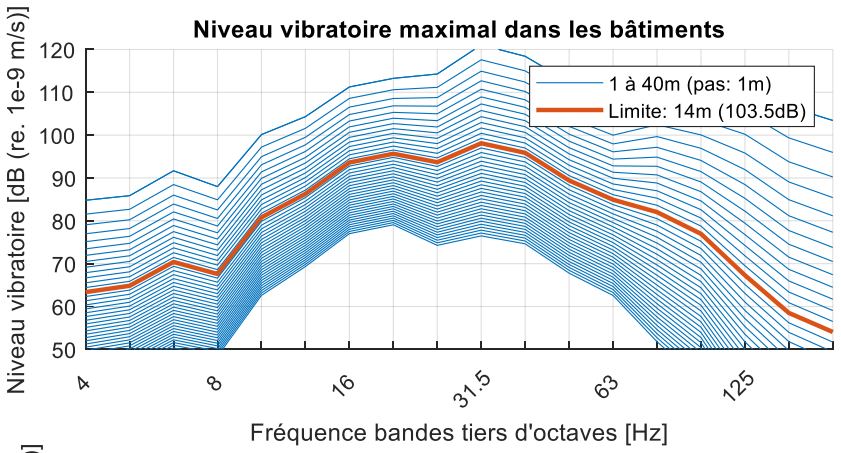


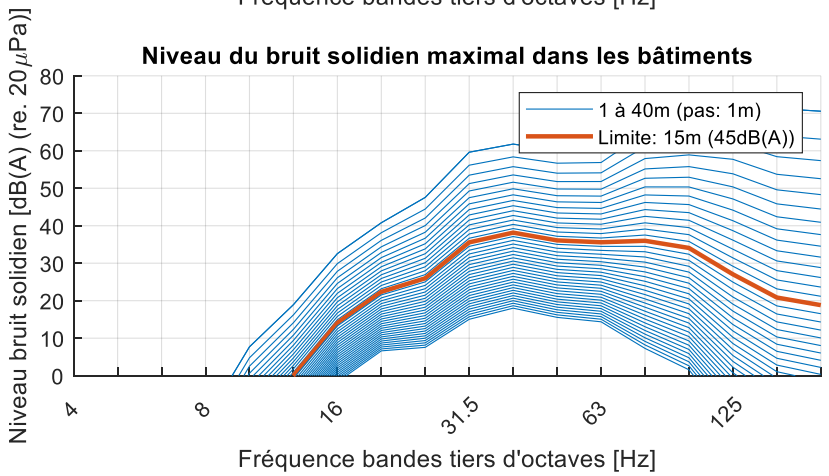


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | -8dB + App. de voie | 40 km/u | SSC typique

S1

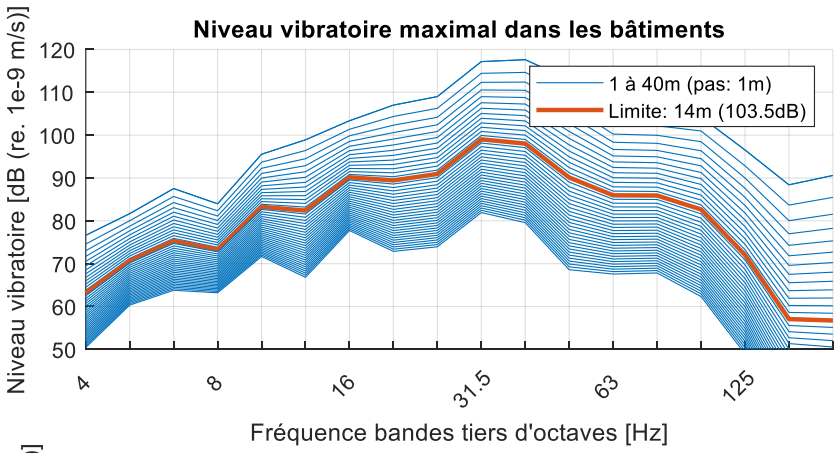


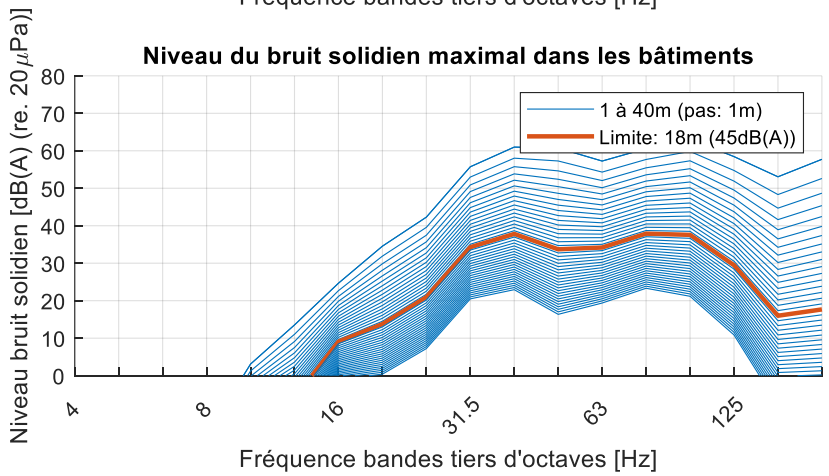


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | -8dB + App. de voie | 40 km/u | SSC typique

S2

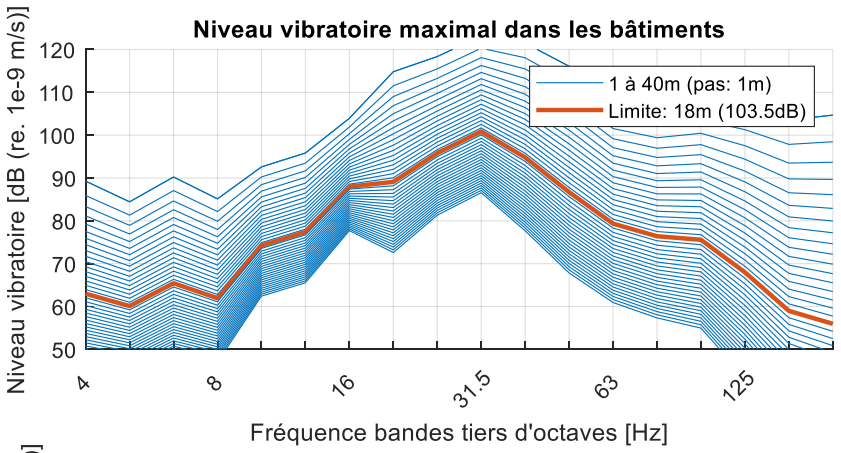


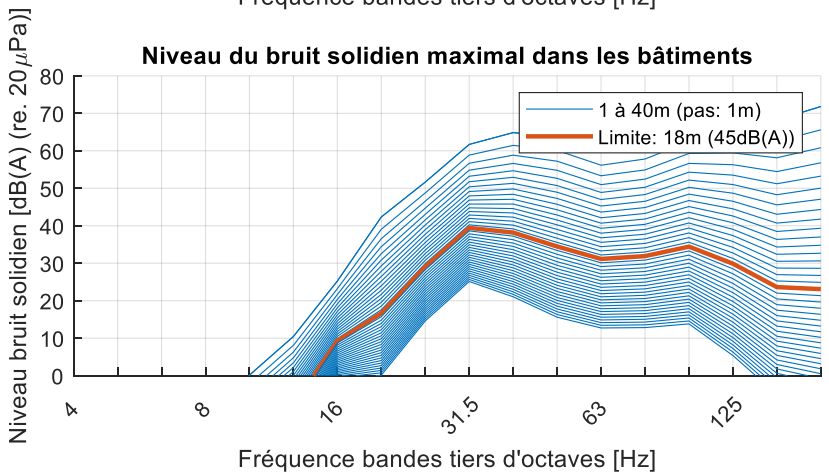


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | -8dB + App. de voie | 40 km/u | SSC typique

S3

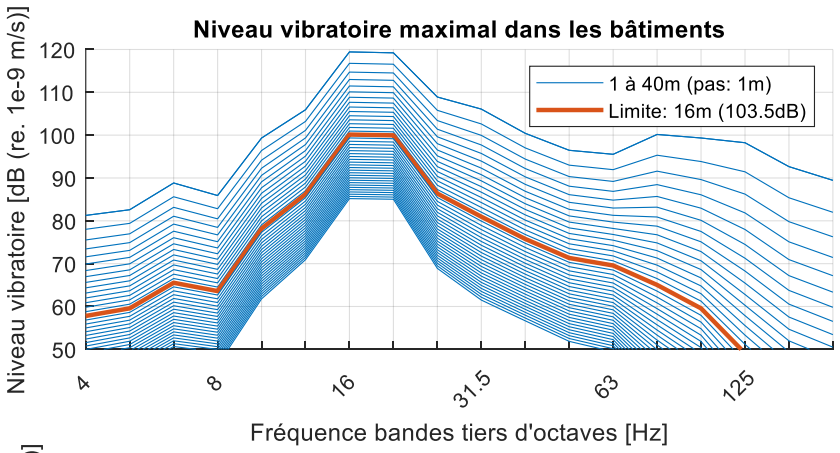


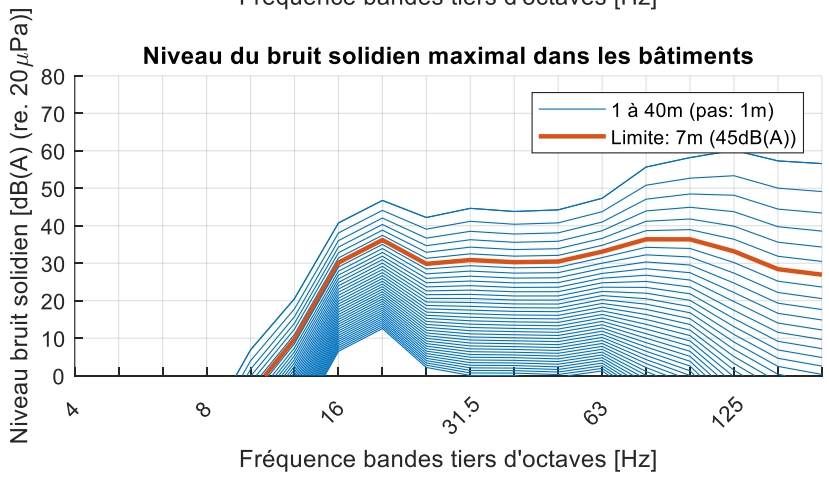


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | -16dB | 80 km/u | SSC typique

S1

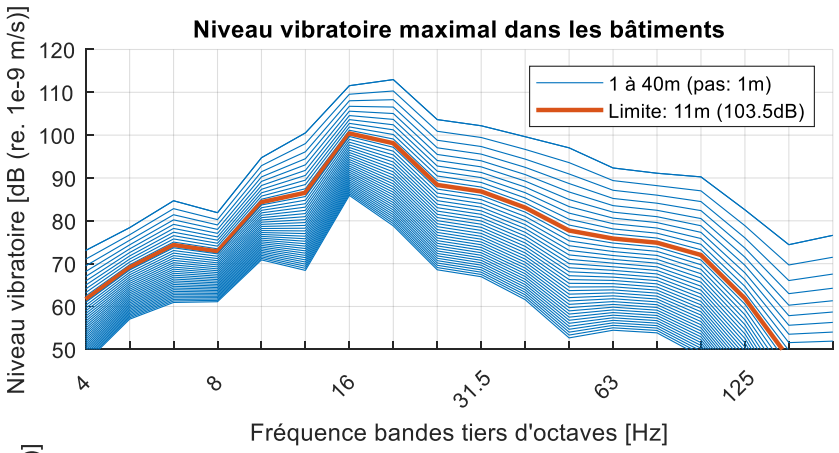


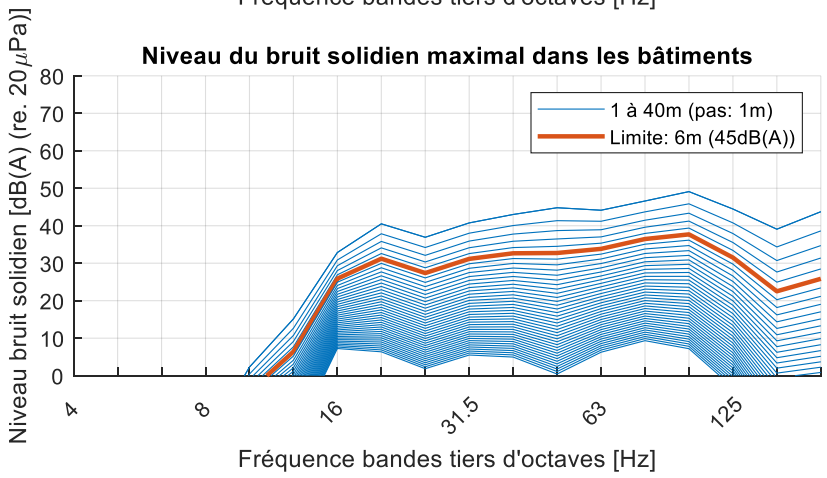


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | -16dB | 80 km/u | SSC typique

S2

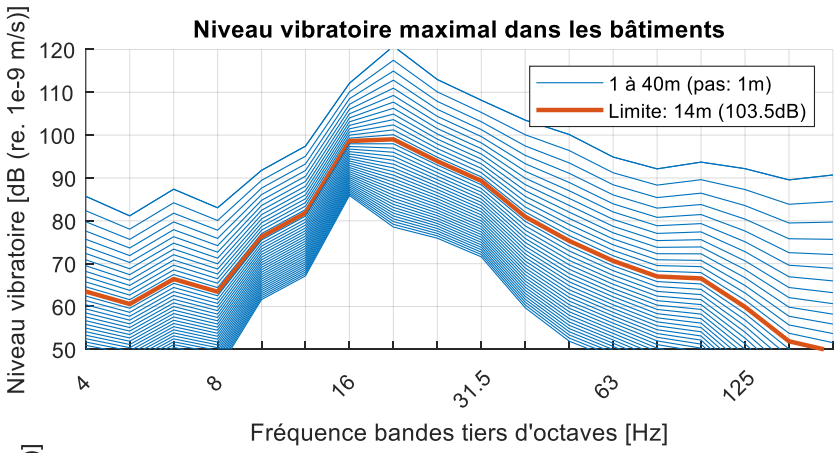


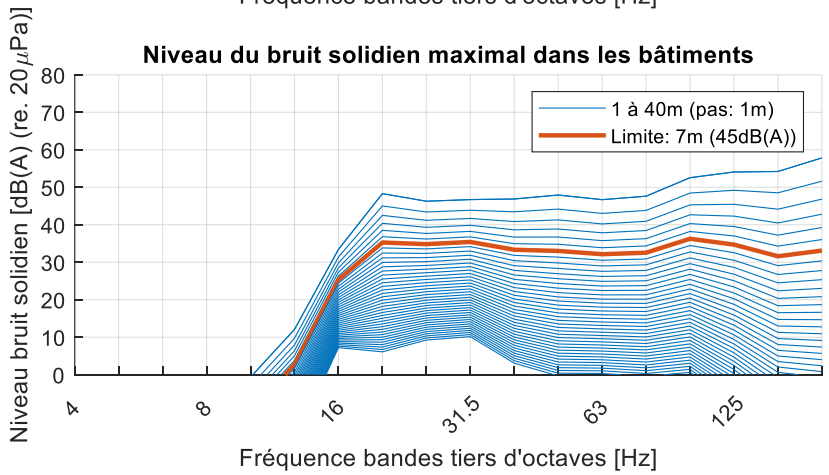


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | -16dB | 80 km/u | SSC typique

S3

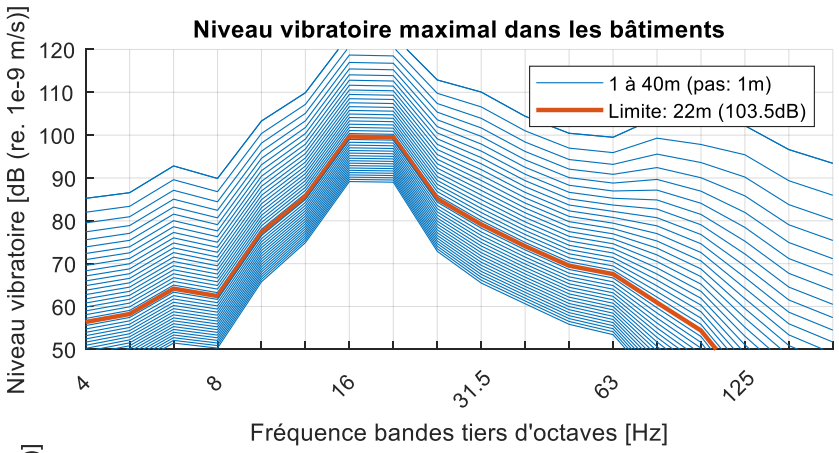


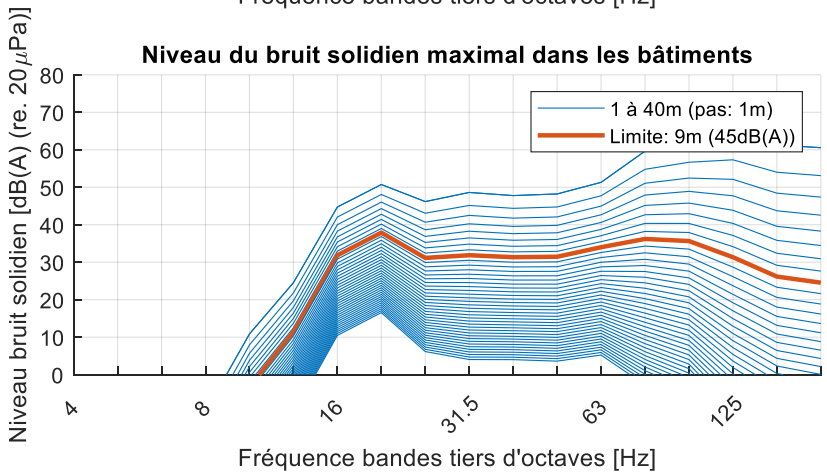


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | -16dB + App. de voie | 40 km/u | SSC typique

S1

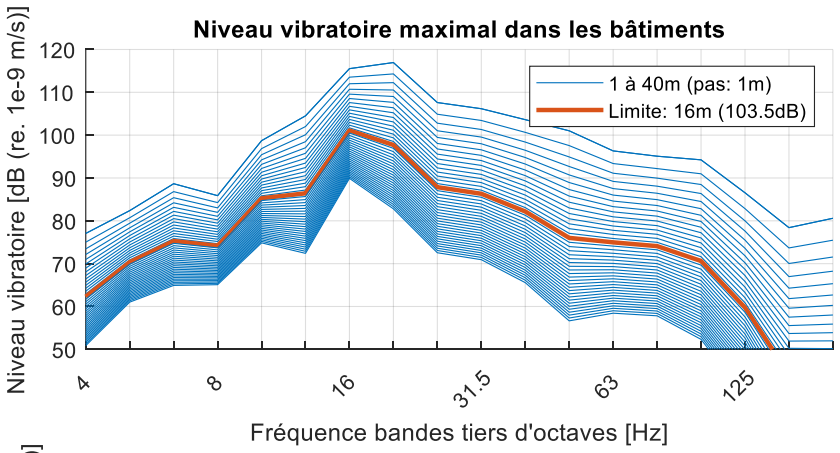


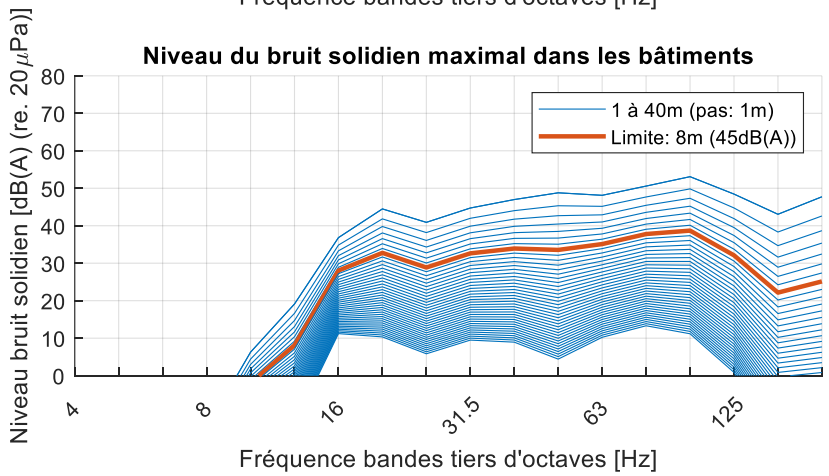


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | -16dB + App. de voie | 40 km/u | SSC typique

S2

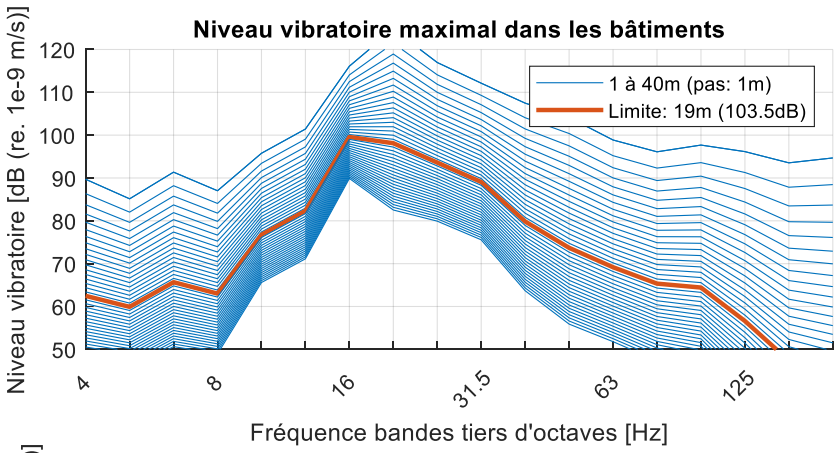


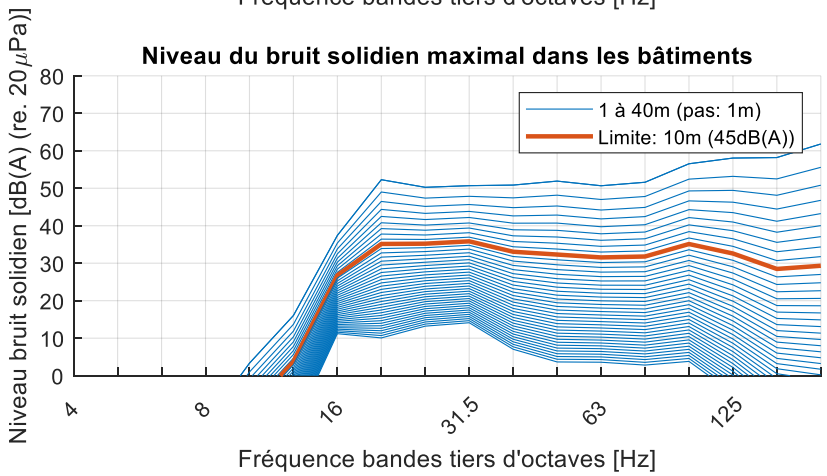


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | -16dB + App. de voie | 40 km/u | SSC typique

S3

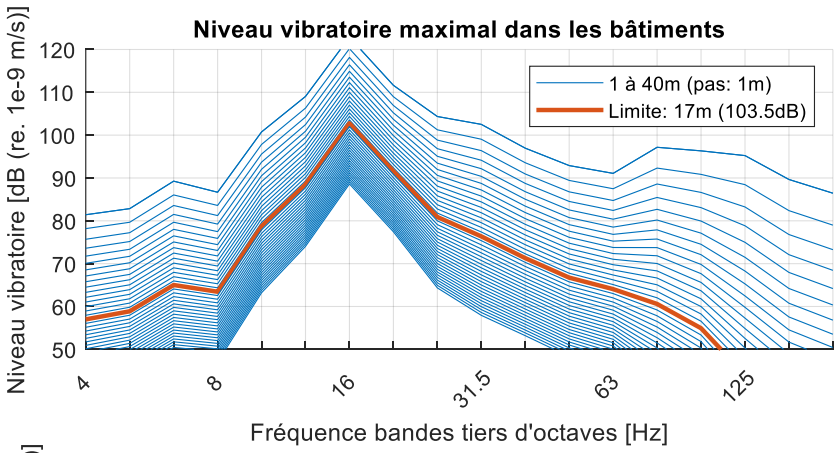


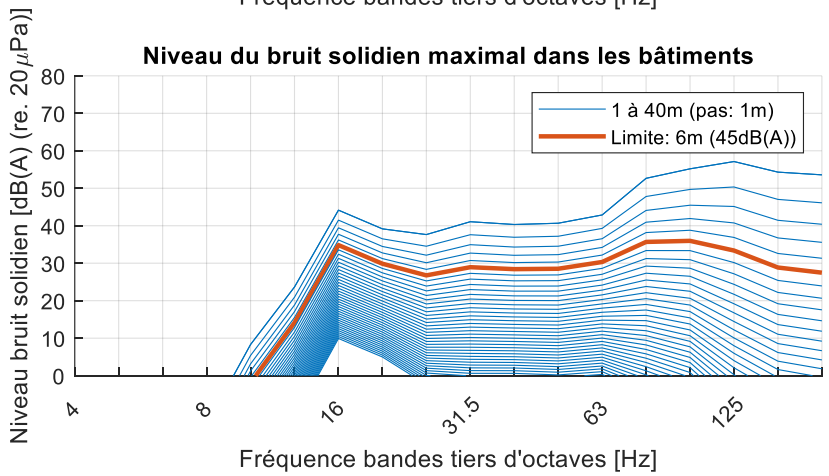


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | -20dB | 80 km/u | SSC typique

S1

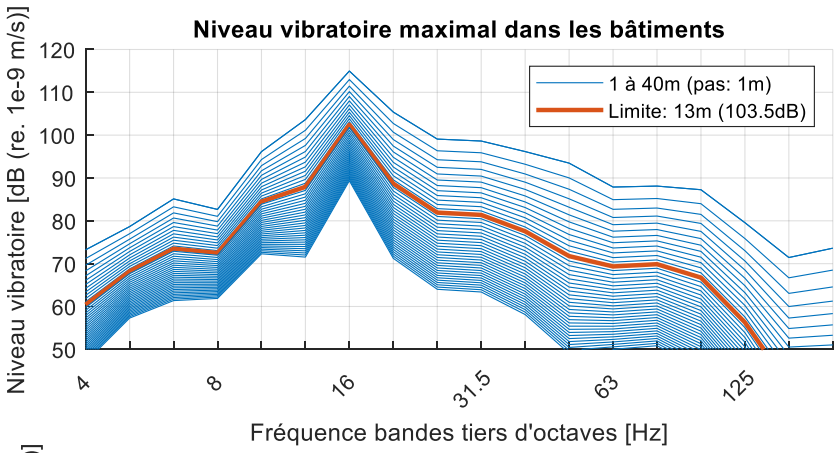


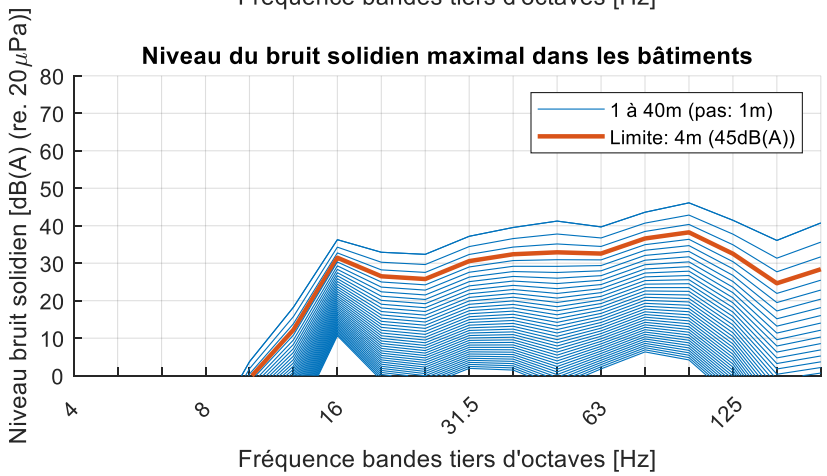


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | -20dB | 80 km/u | SSC typique

S2

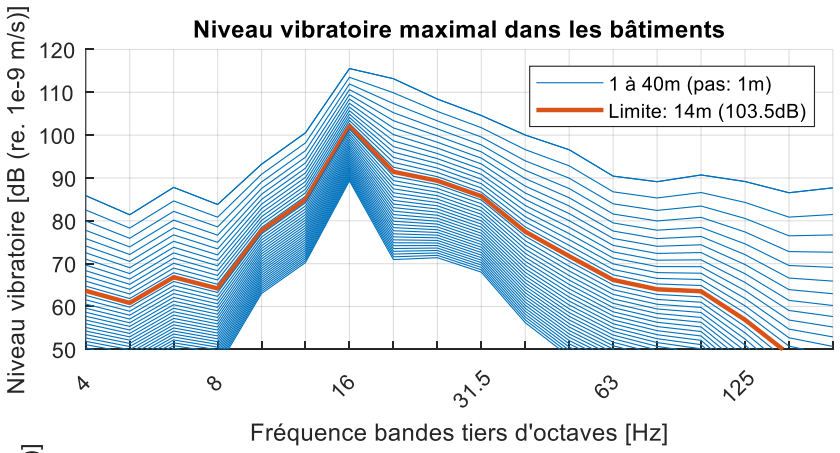


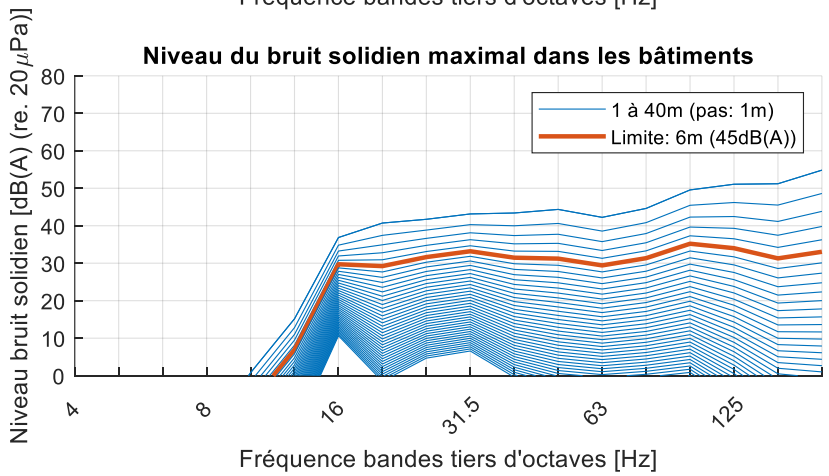


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | -20dB | 80 km/u | SSC typique

S3

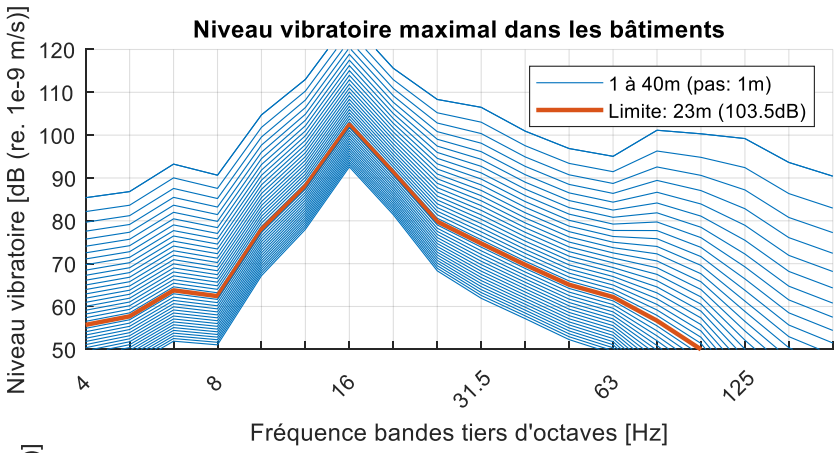


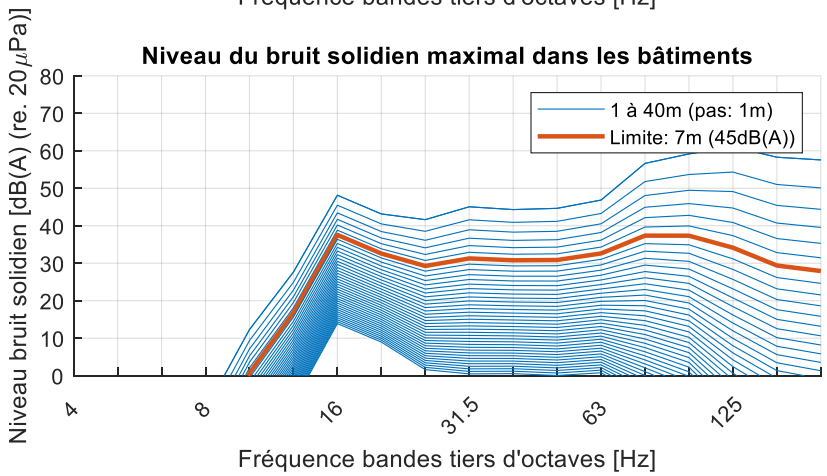


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | -20dB + App. de voie | 40 km/u | SSC typique

S1

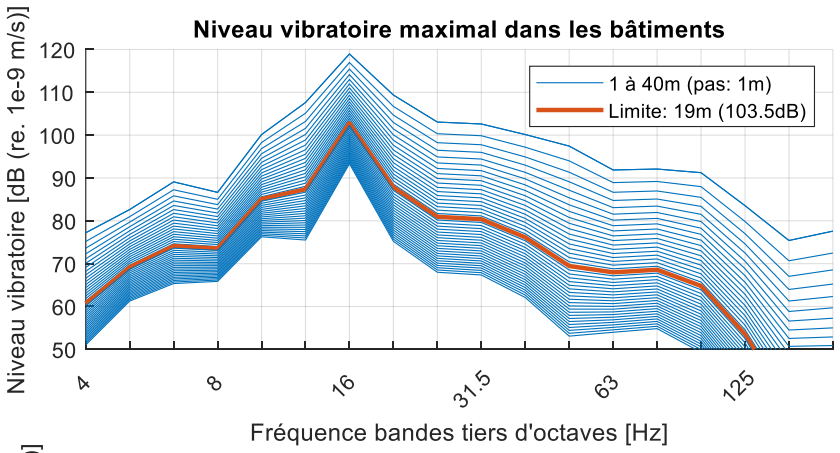


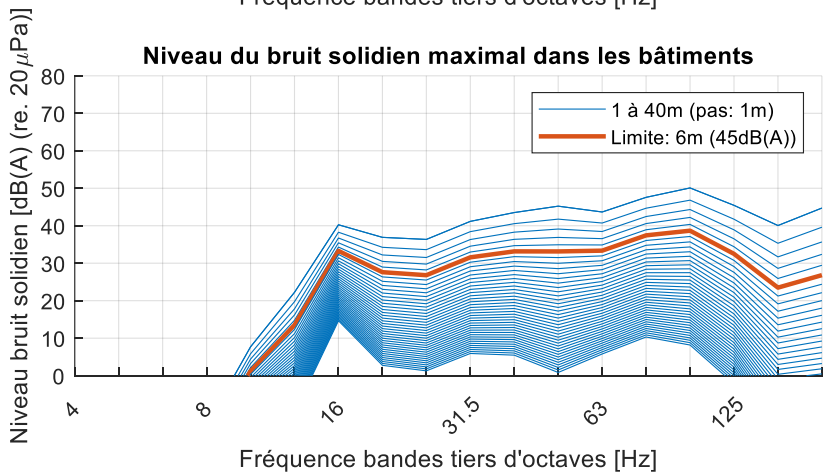


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | -20dB + App. de voie | 40 km/u | SSC typique

S2

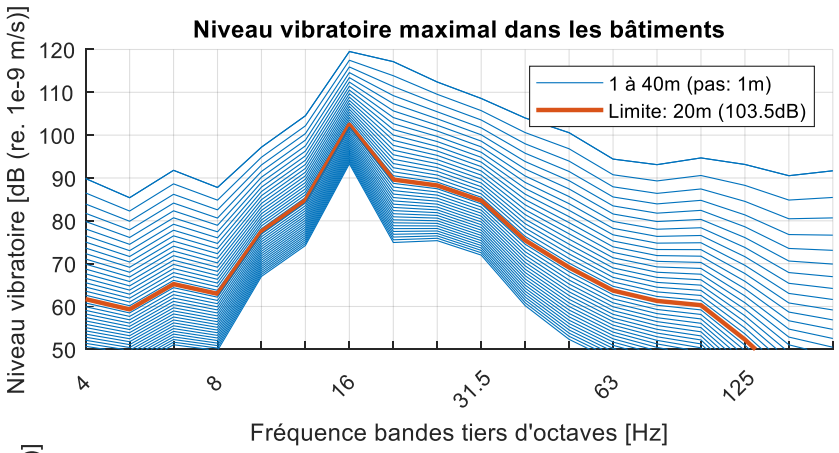


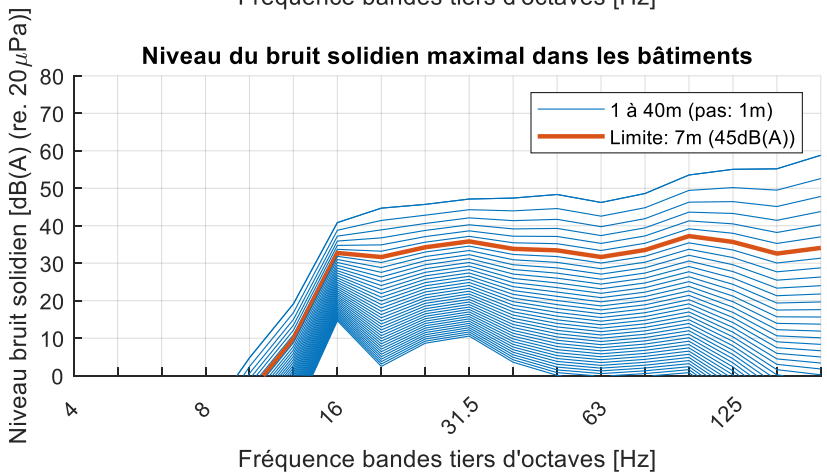


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | -20dB + App. de voie | 40 km/u | SSC typique

S3



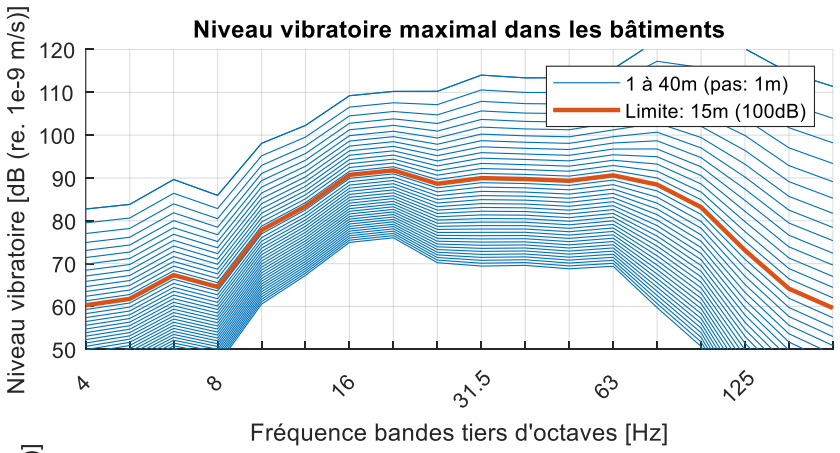


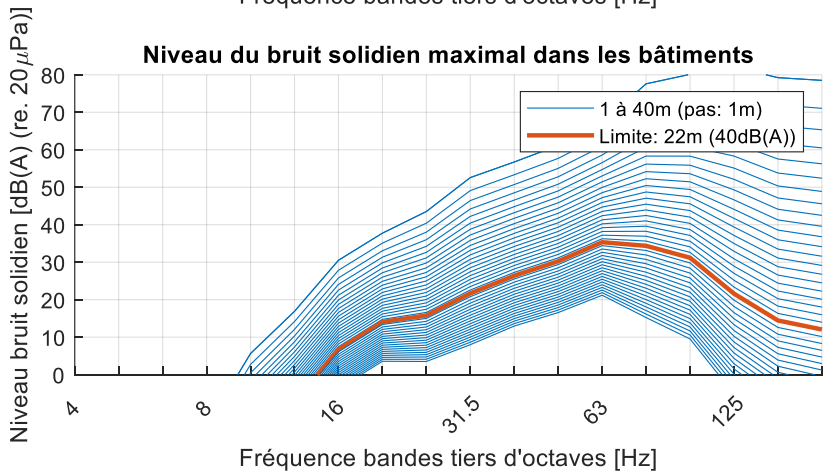
ANNEXE D – RÉSULTATS DE CALCUL « TRACÉ OPTIMISÉ » – ZONE 4 (ZONE RÉSIDENTIELLE)

N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | 100 km/u | SSC typique

S1

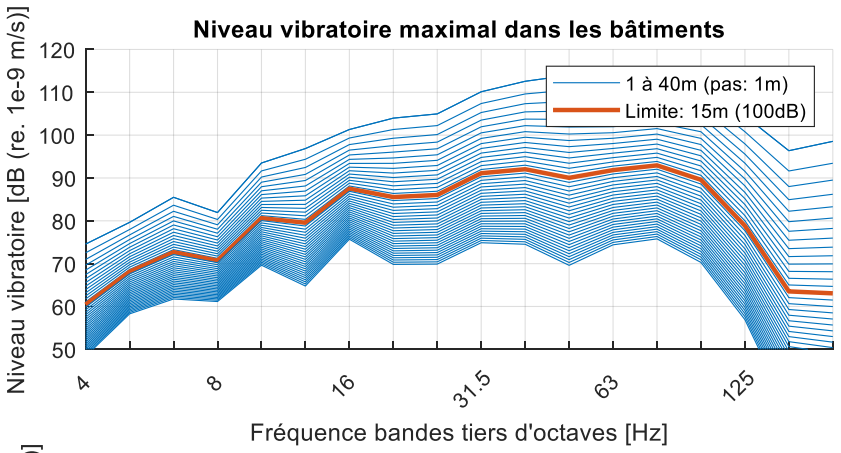


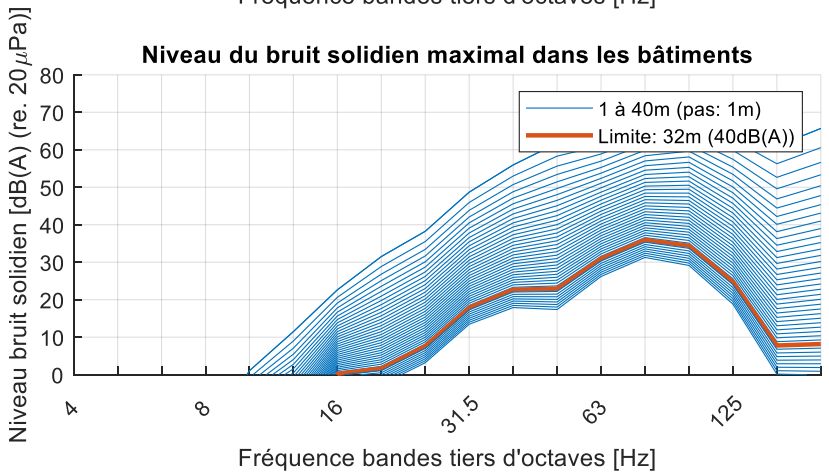


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | 100 km/u | SSC typique

S2

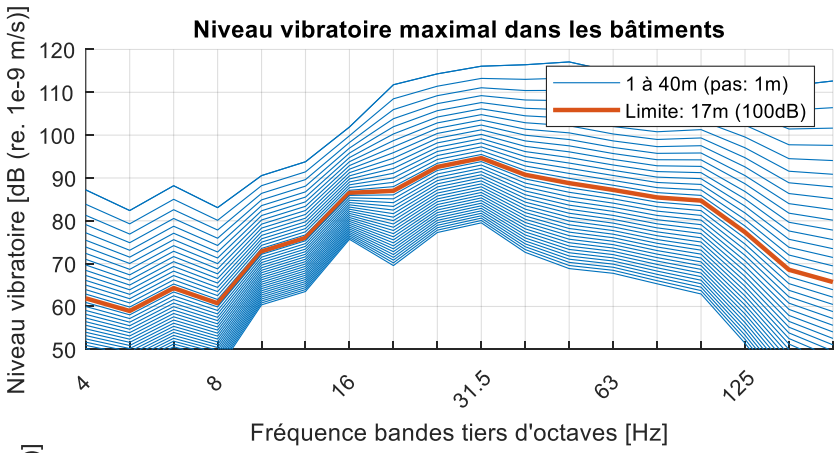


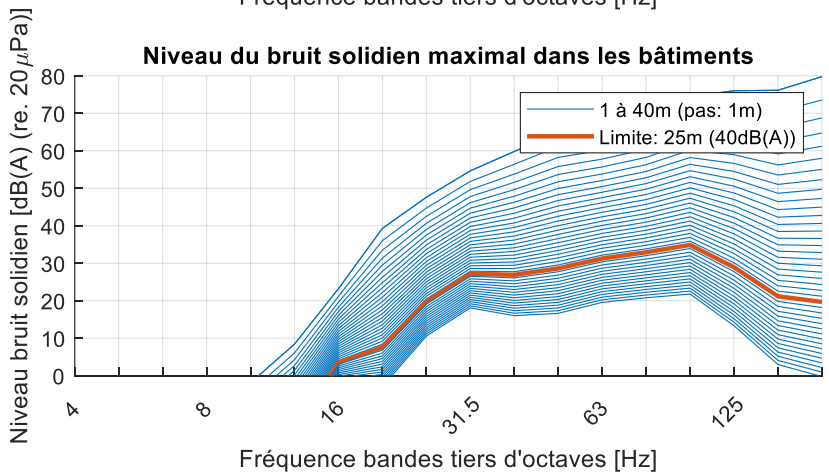


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | 100 km/u | SSC typique

S3

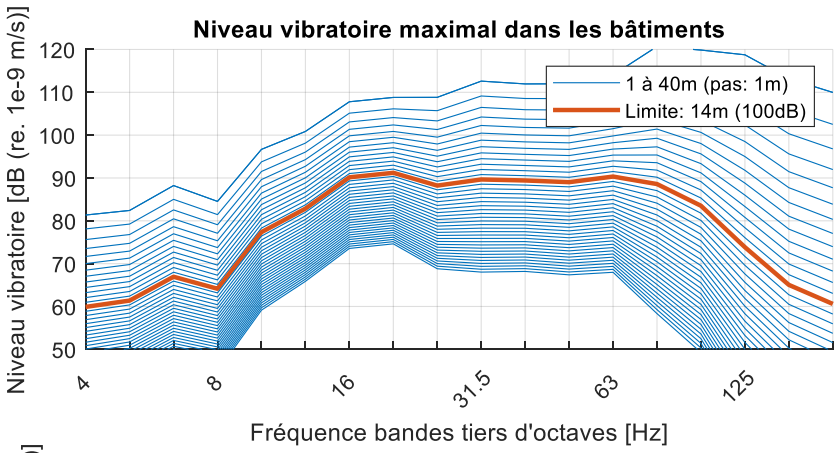


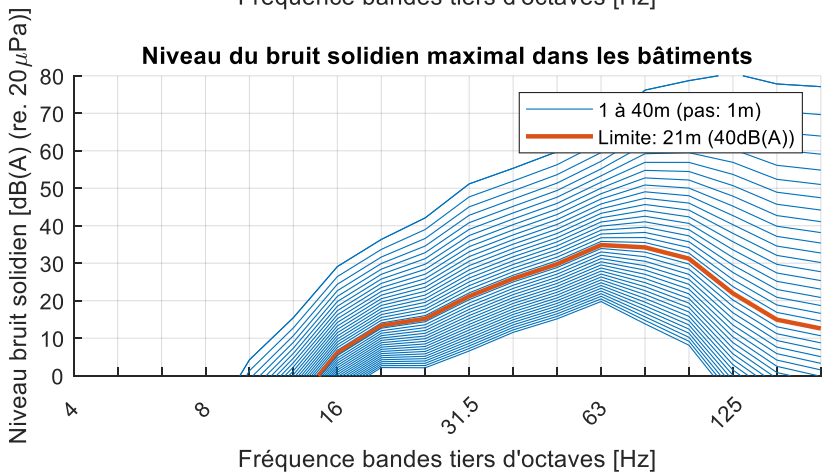


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | 85 km/u | SSC typique

S1

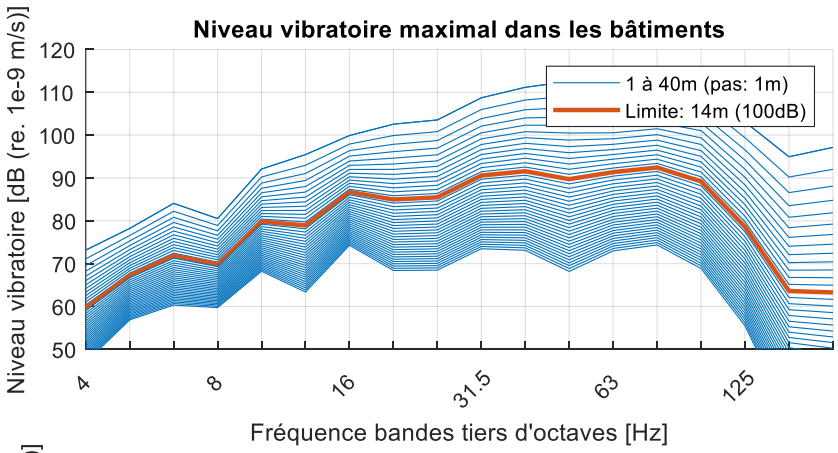


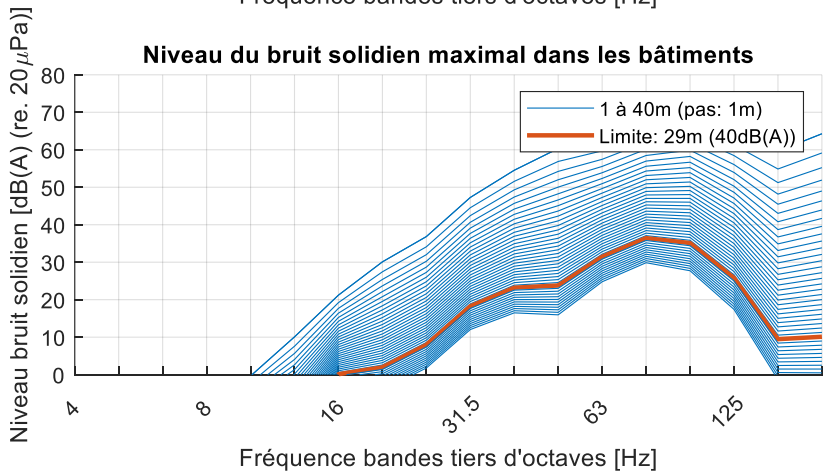


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | 85 km/u | SSC typique

S2

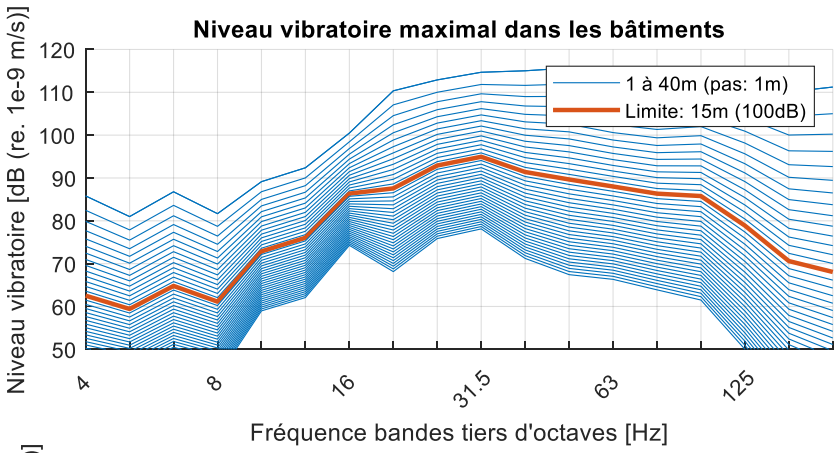


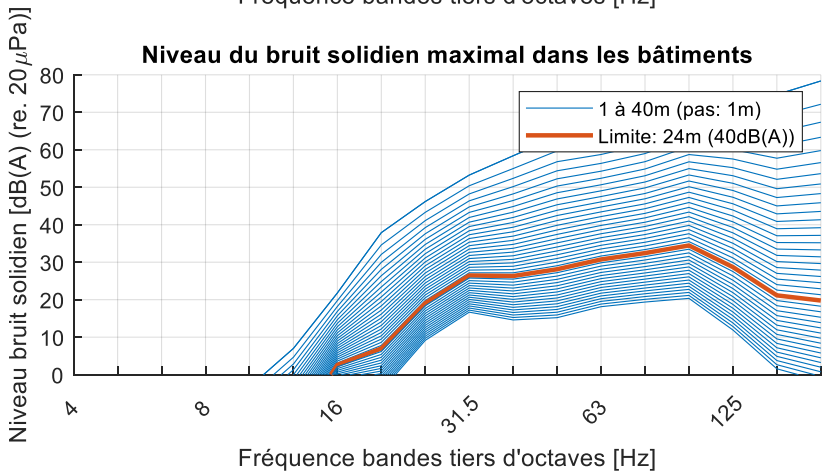


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | 85 km/u | SSC typique

S3

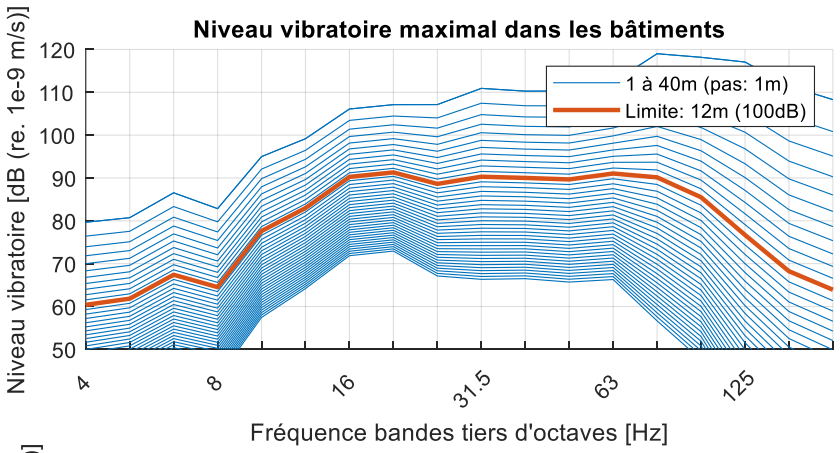


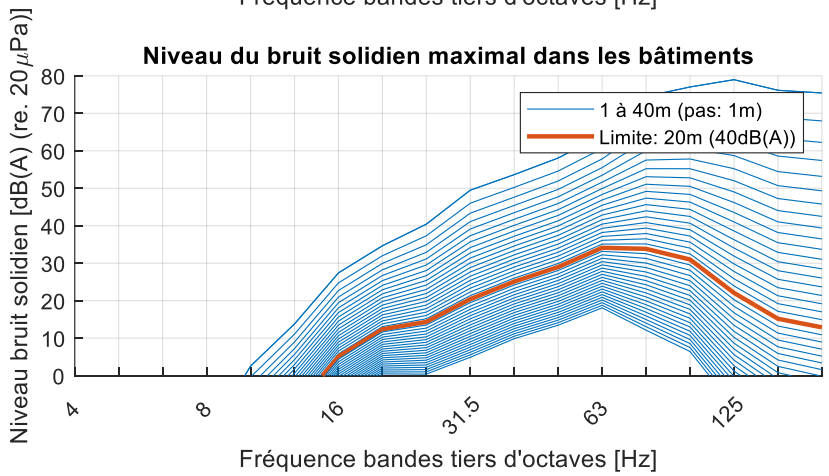


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | 70 km/u | SSC typique

S1

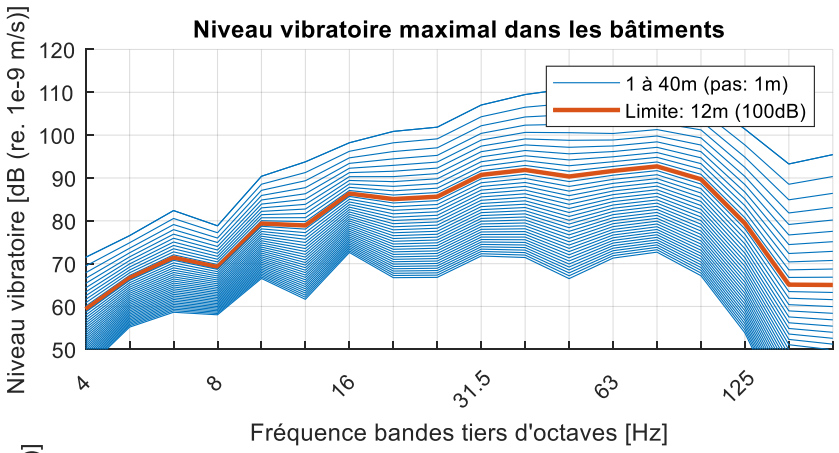


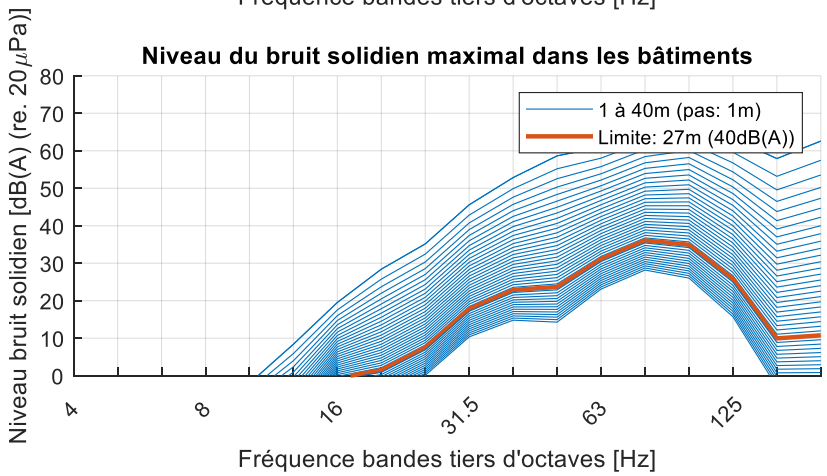


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | 70 km/u | SSC typique

S2

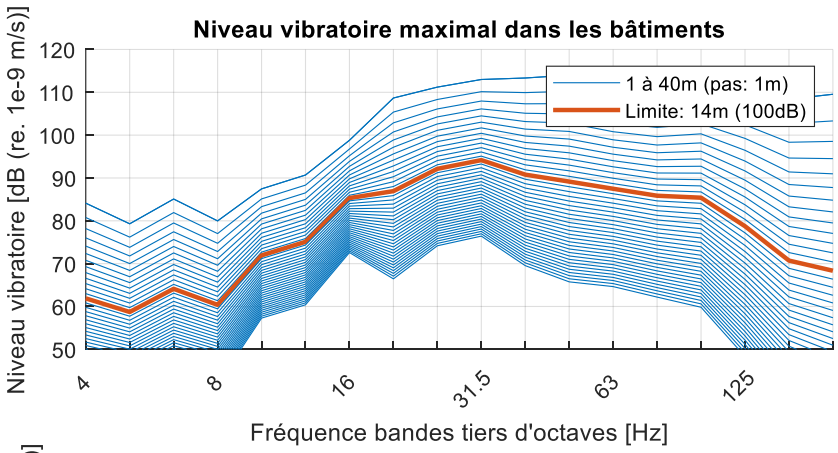


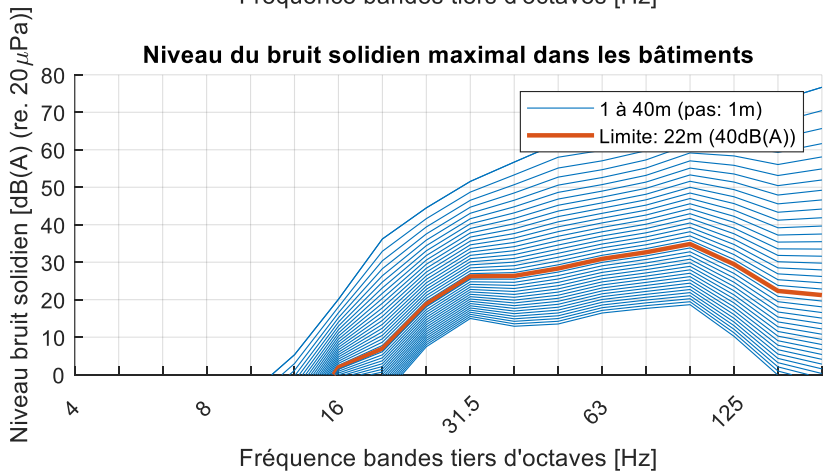


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | 70 km/u | SSC typique

S3

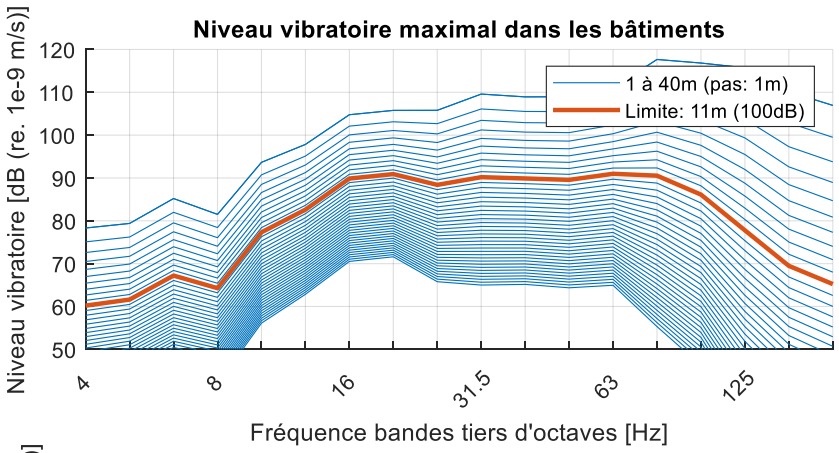


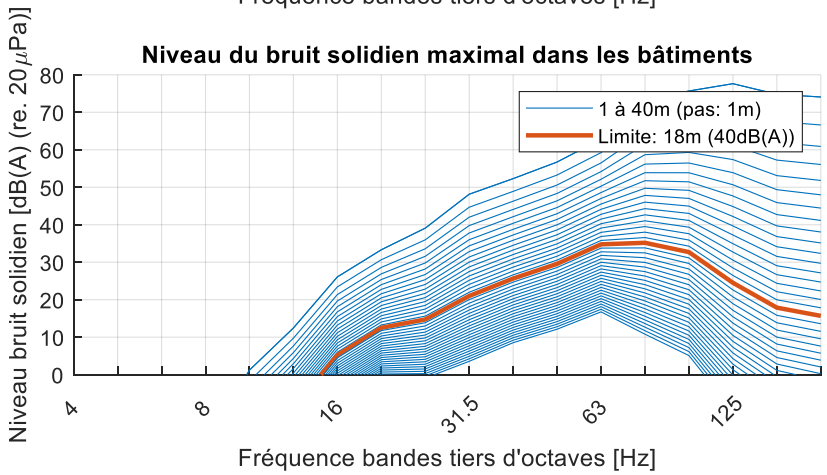


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | 60 km/u | SSC typique

S1

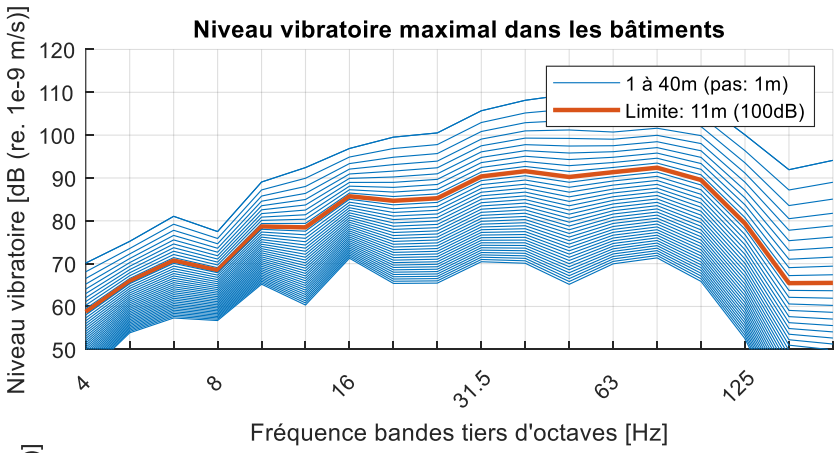


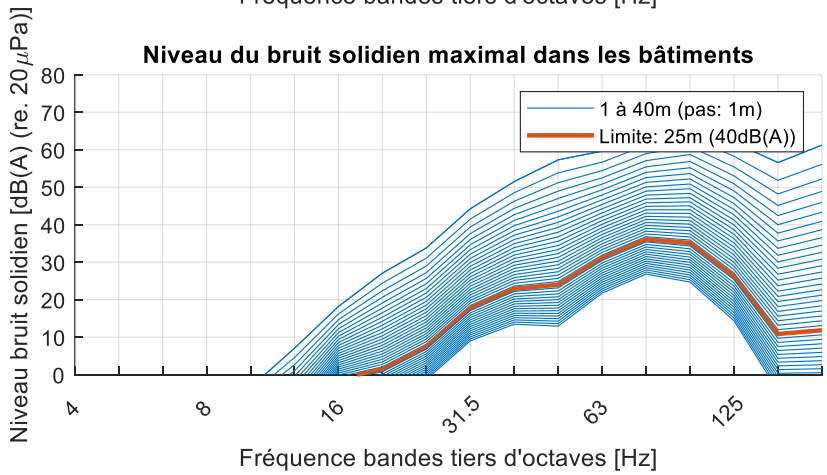


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | 60 km/u | SSC typique

S2

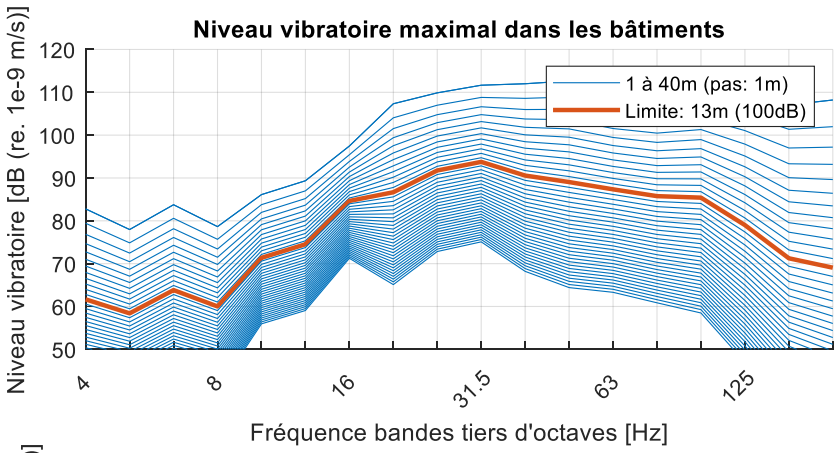


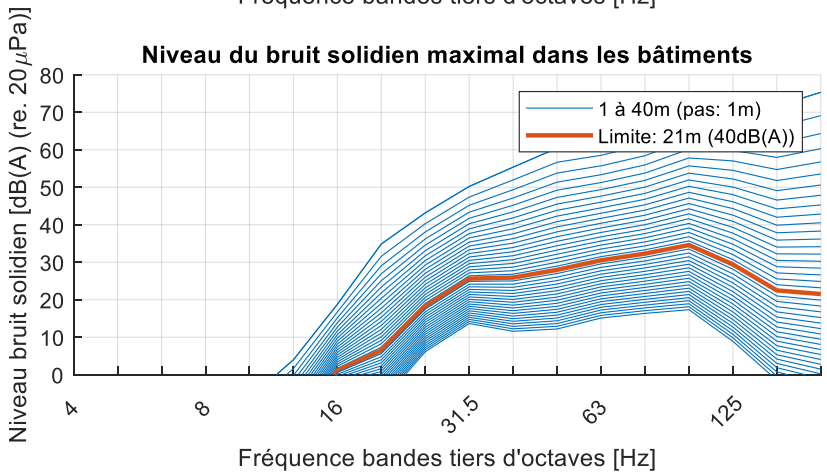


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | 60 km/u | SSC typique

S3

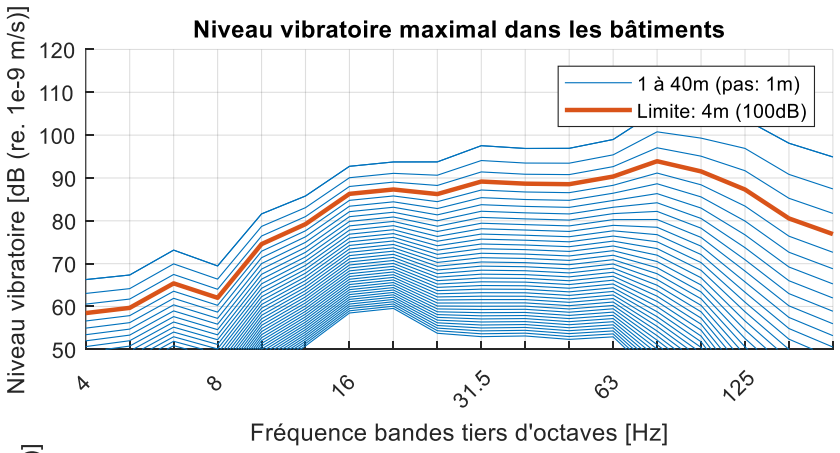


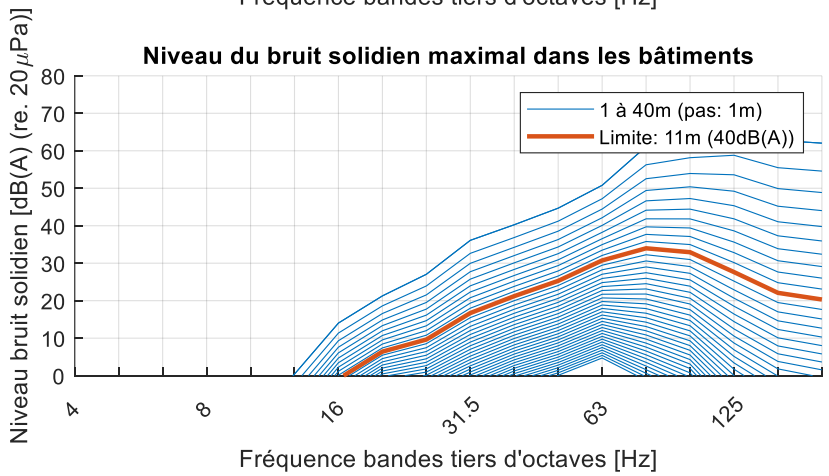


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | 15 km/u | SSC typique

S1

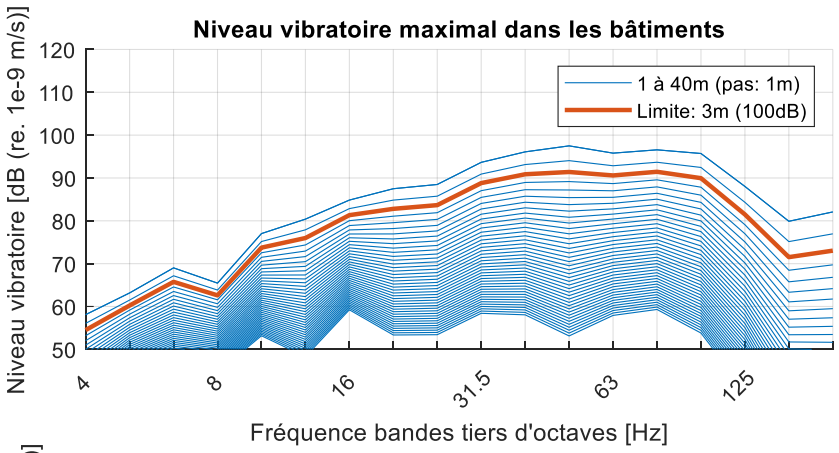


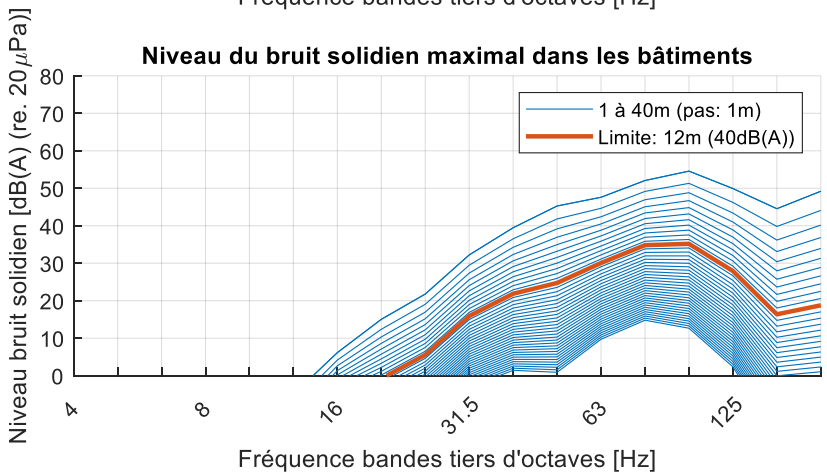


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | 15 km/u | SSC typique

S2

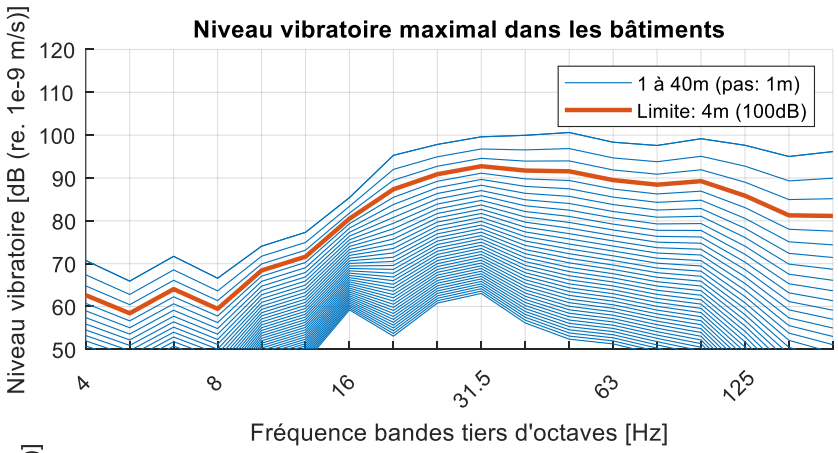


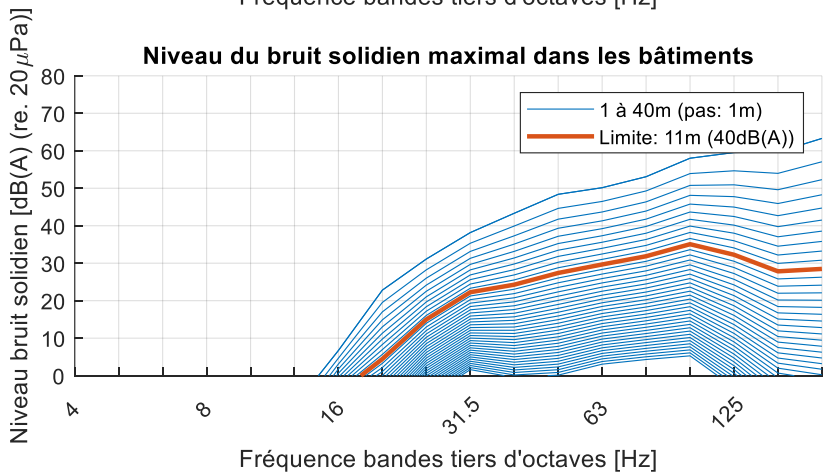


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | 15 km/u | SSC typique

S3

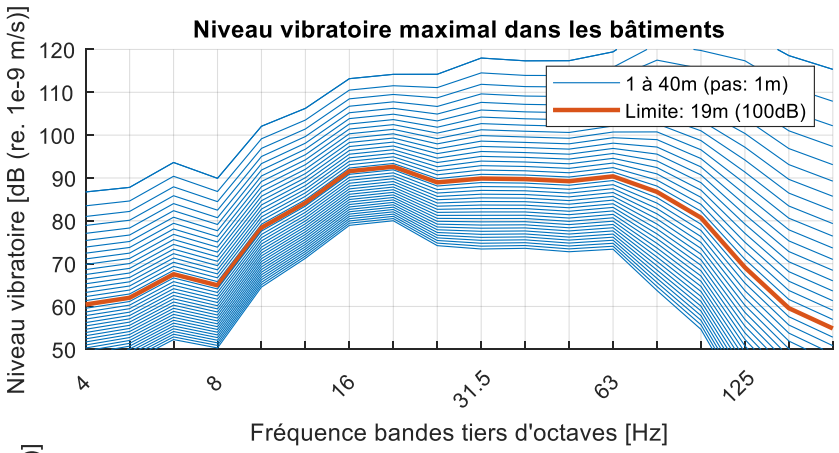


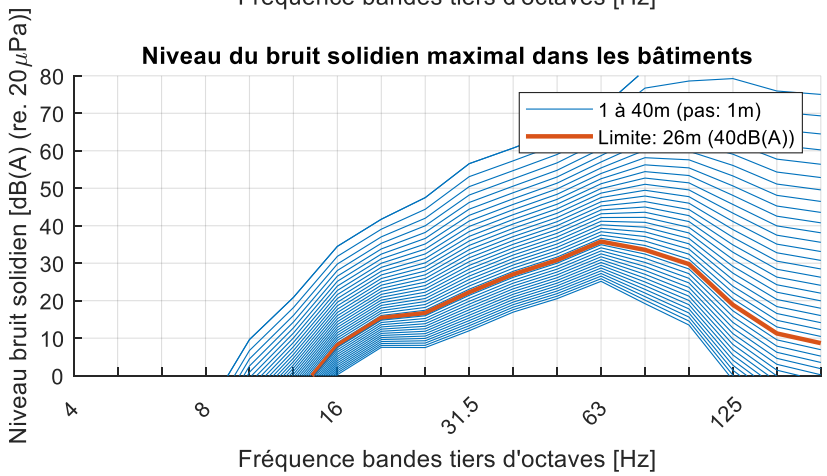


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | Pose classique + App. de voie | 50 km/u | SSC typique

S1

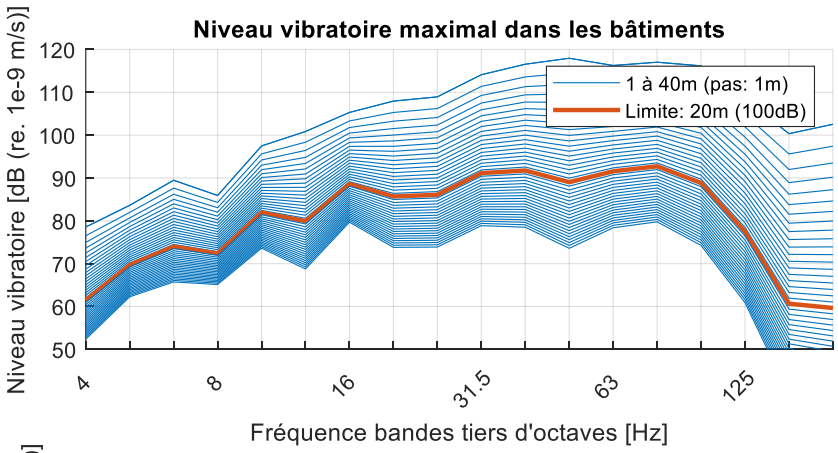


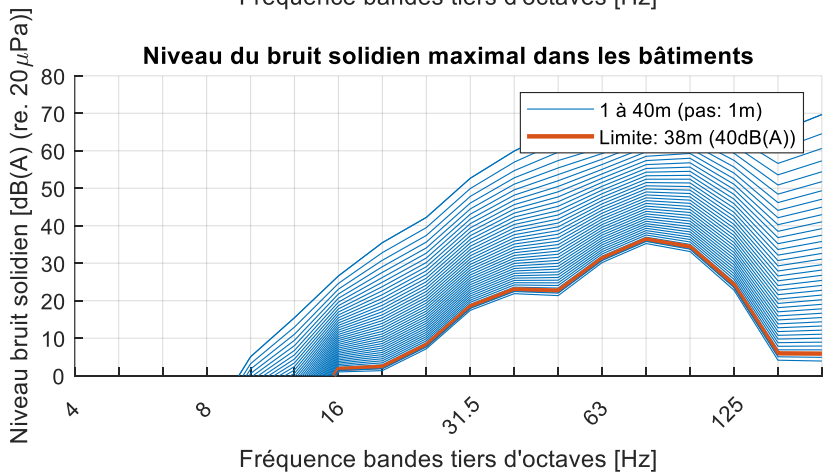


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | Pose classique + App. de voie | 50 km/u | SSC typique

S2

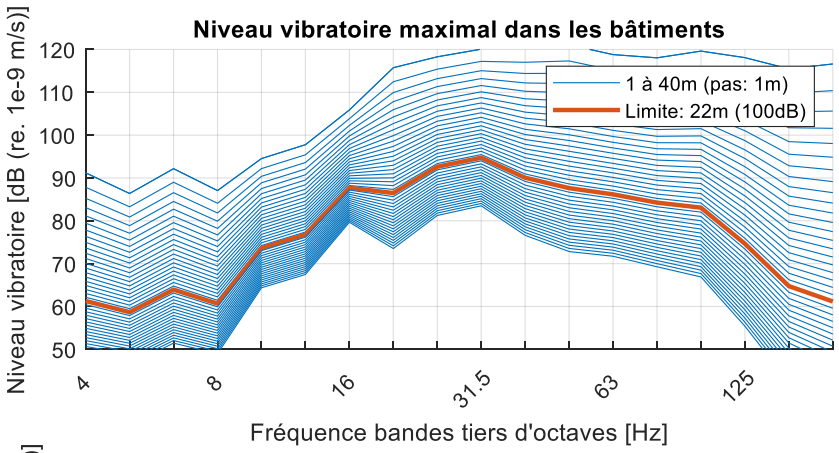


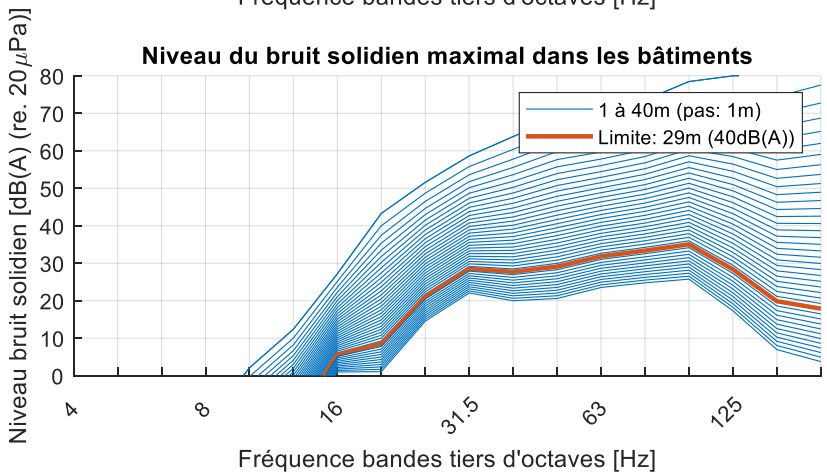


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | Pose classique + App. de voie | 50 km/u | SSC typique

S3

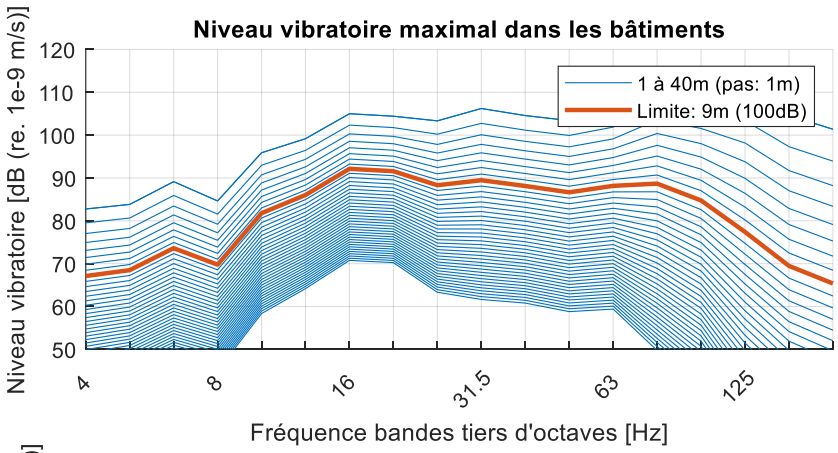


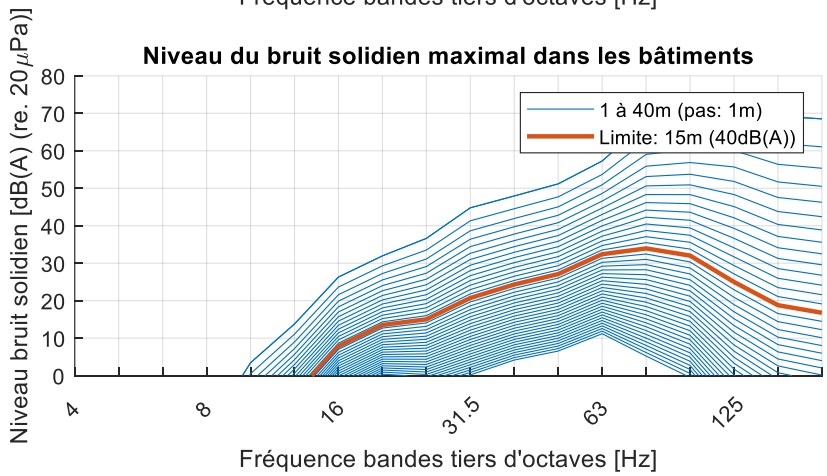


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | 100 km/u | SSC typique + OA (Viaduct)

S1

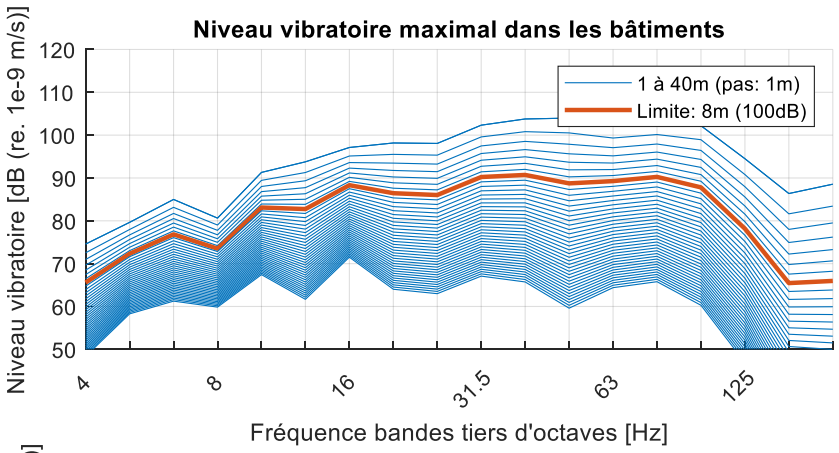


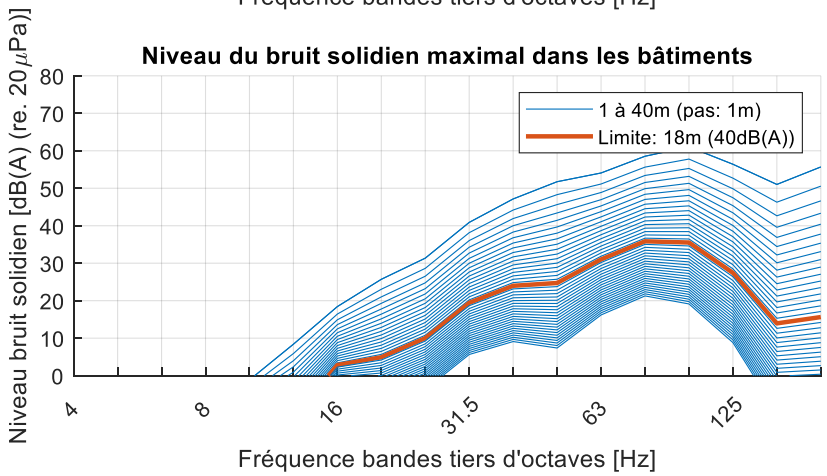


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | 100 km/u | SSC typique + OA (Viaduct)

S2

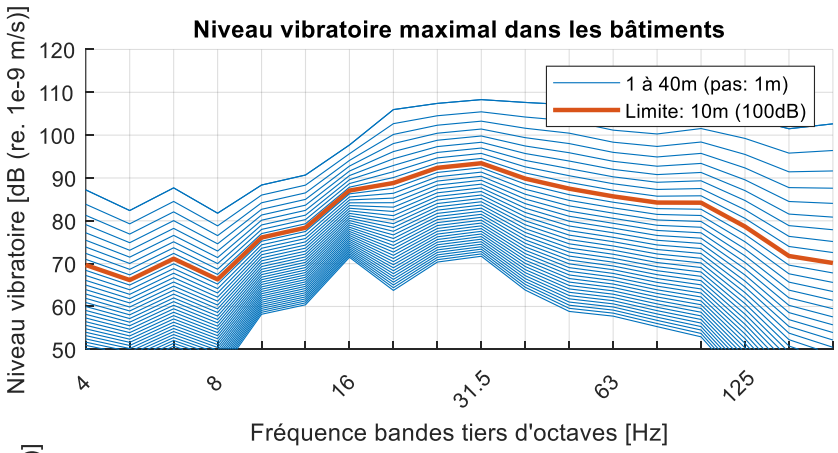


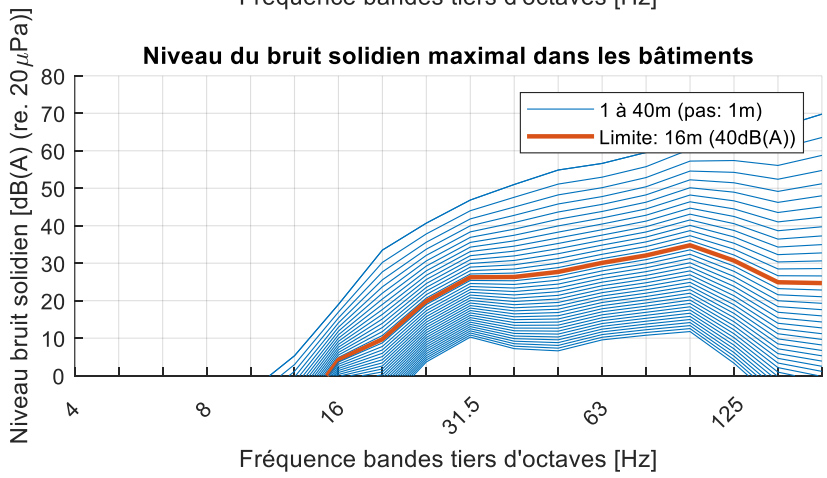


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | 100 km/u | SSC typique + OA (Viaduct)

S3

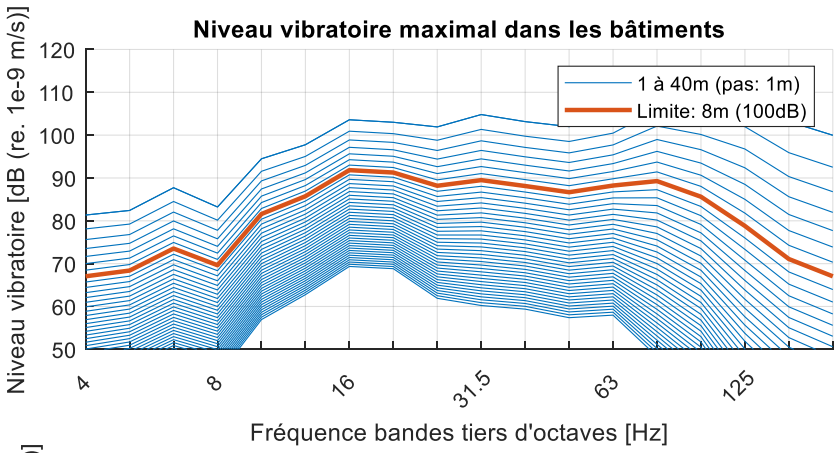


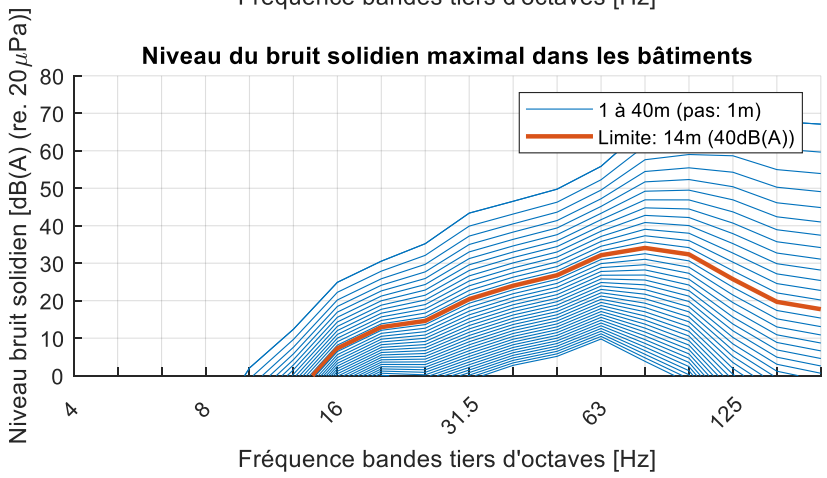


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | 85 km/u | SSC typique + OA (Viaduct)

S1

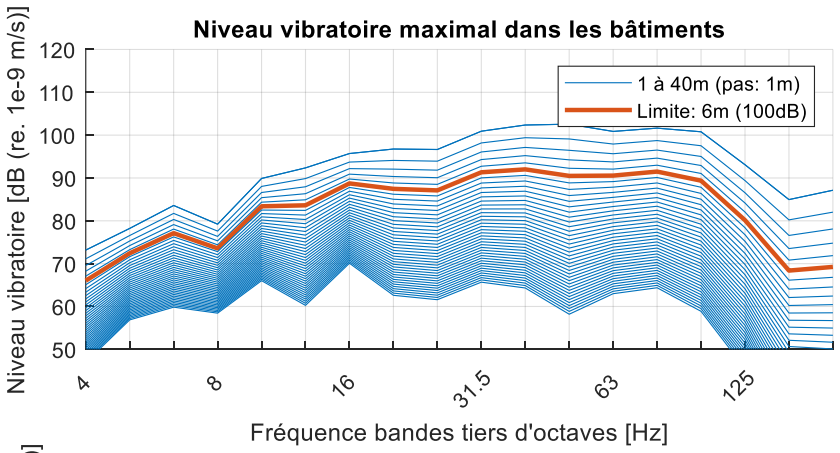


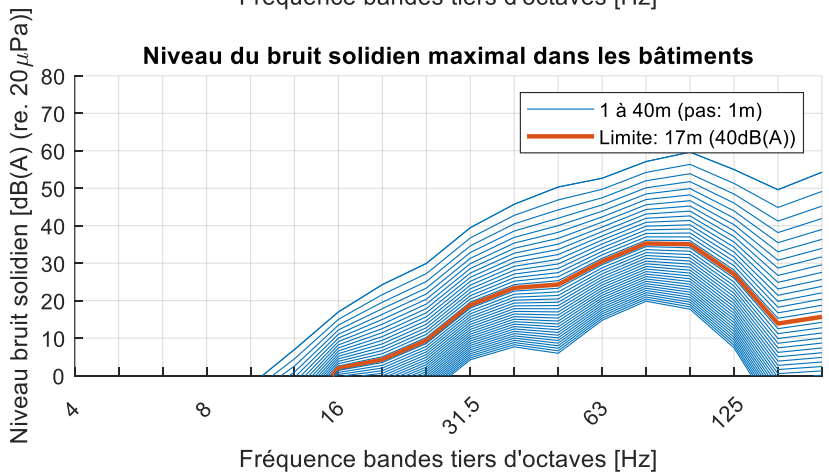


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | 85 km/u | SSC typique + OA (Viaduct)

S2

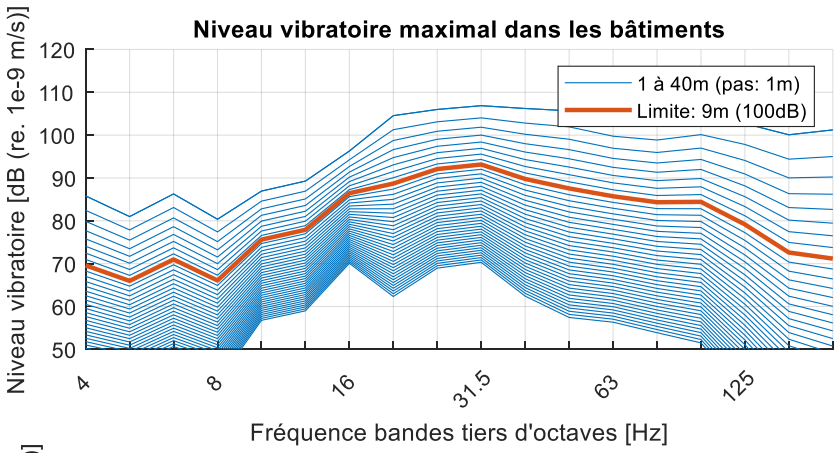


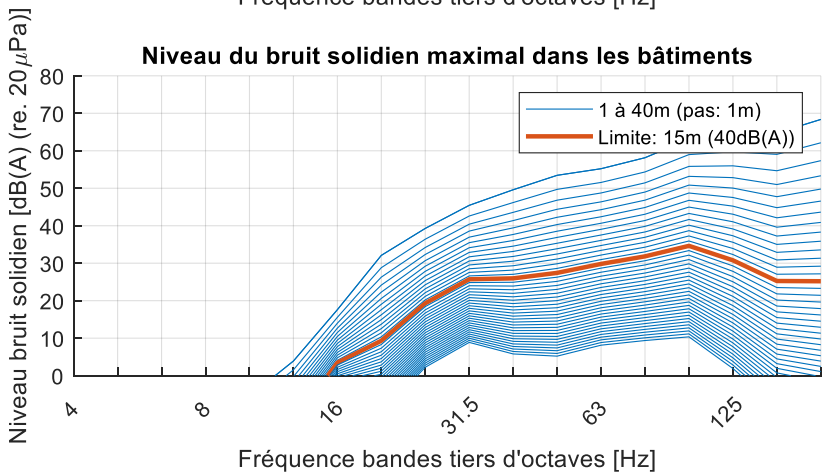


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | 85 km/u | SSC typique + OA (Viaduct)

S3

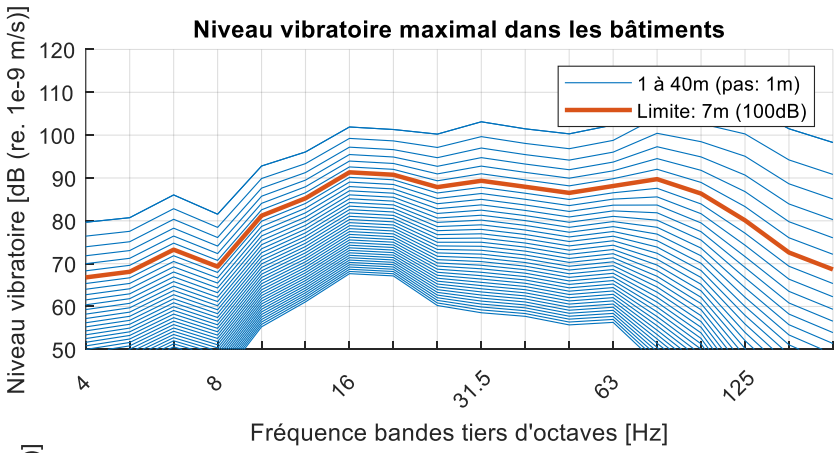


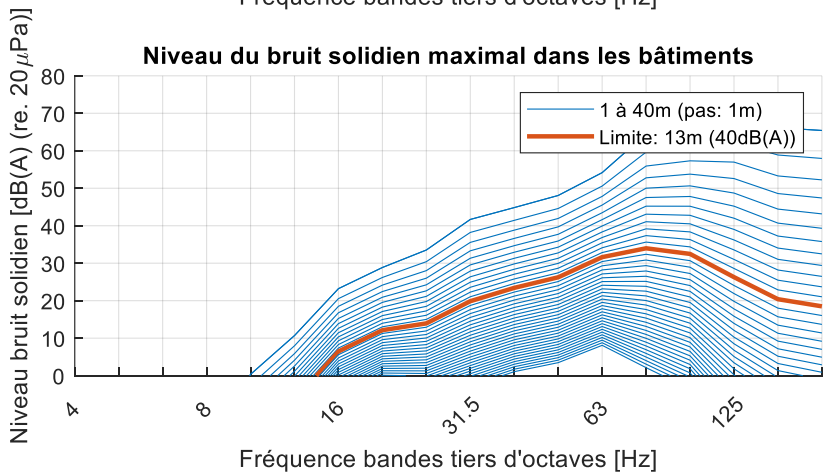


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | 70 km/u | SSC typique + OA (Viaduct)

S1

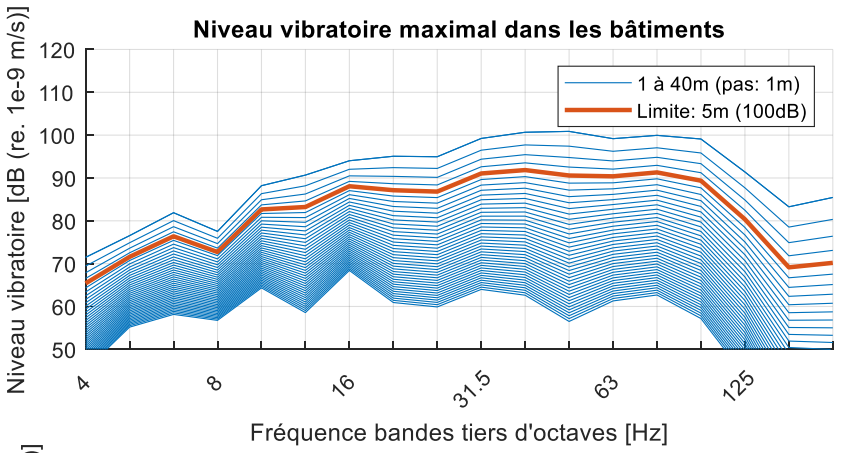


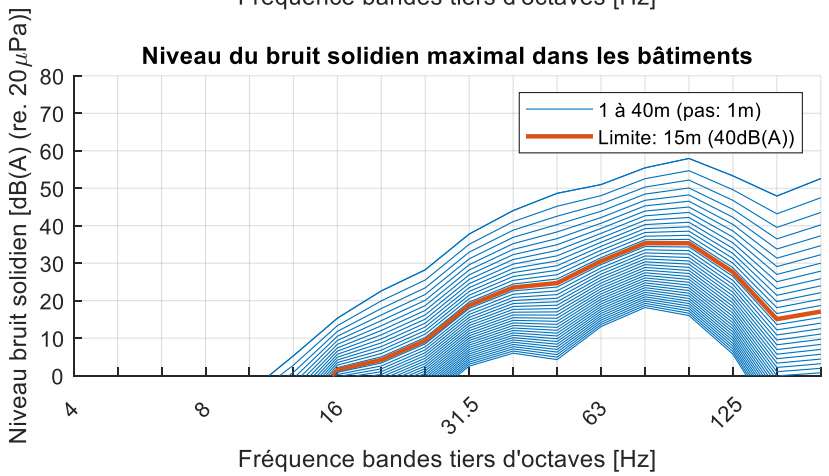


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | 70 km/u | SSC typique + OA (Viaduct)

S2

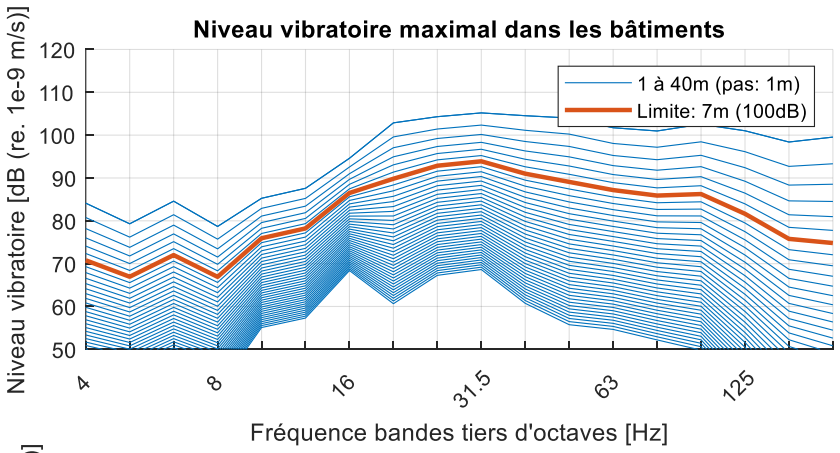


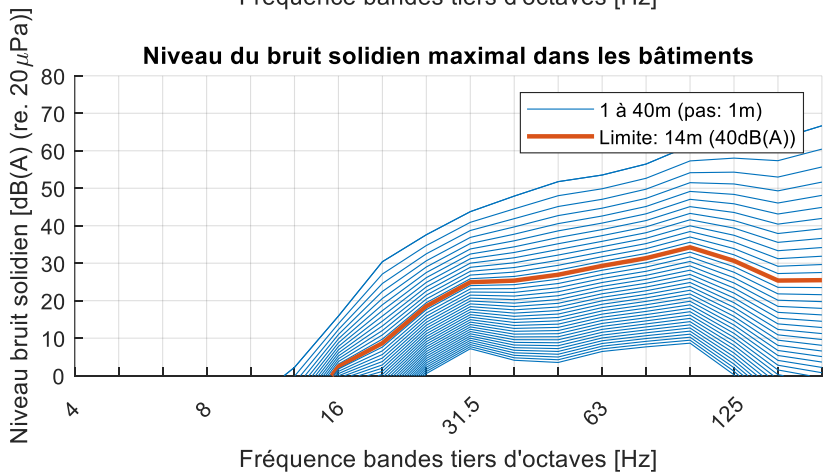


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | 70 km/u | SSC typique + OA (Viaduct)

S3

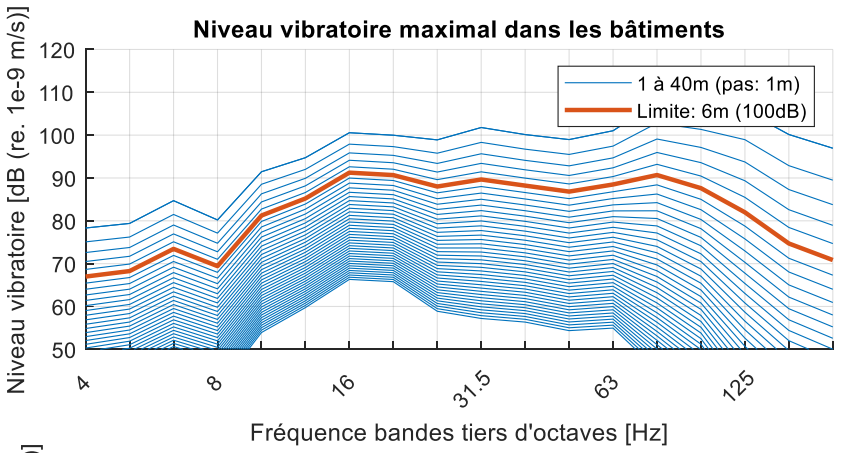


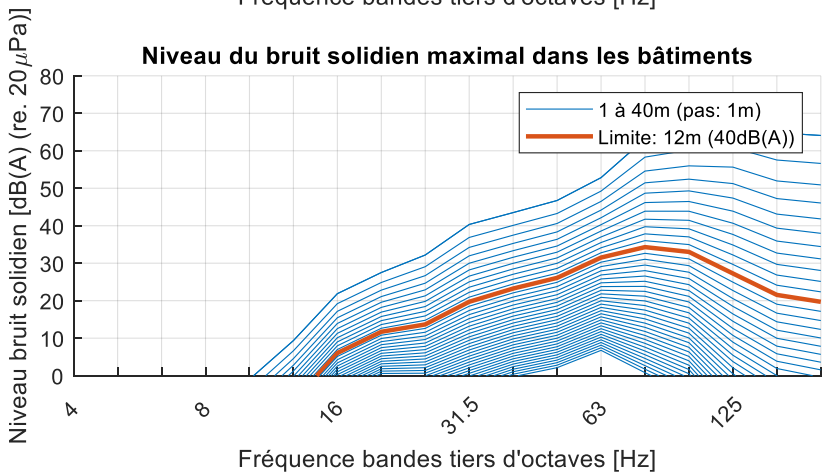


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | 60 km/u | SSC typique + OA (Viaduct)

S1

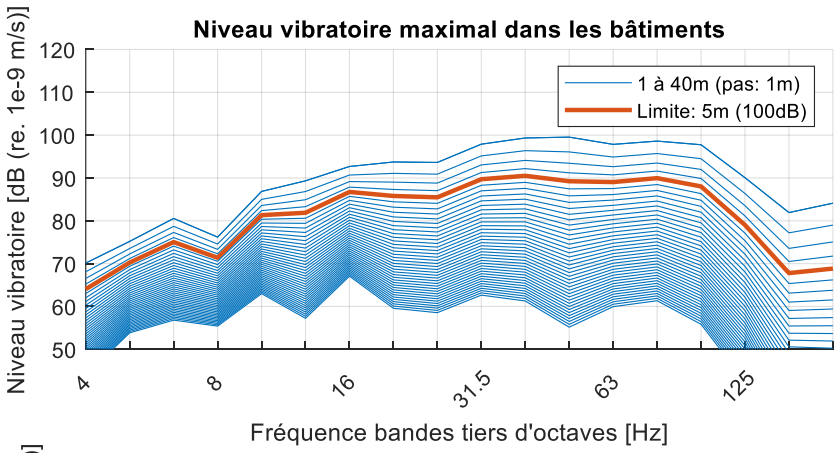


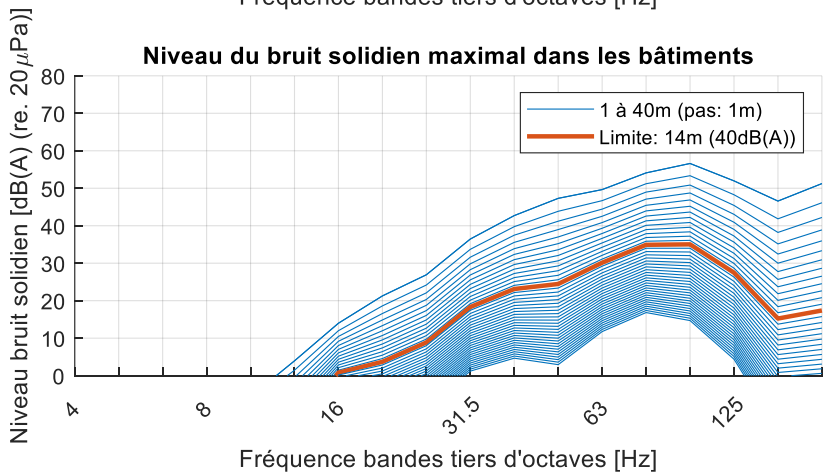


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | 60 km/u | SSC typique + OA (Viaduct)

S2

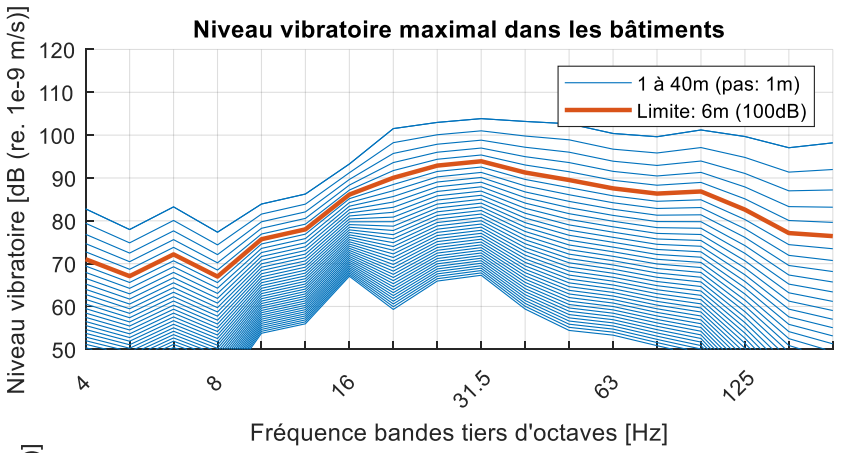


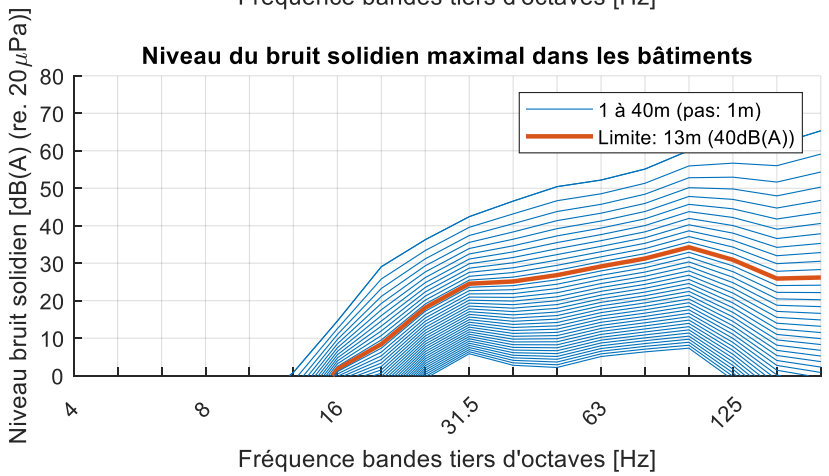


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | 60 km/u | SSC typique + OA (Viaduct)

S3

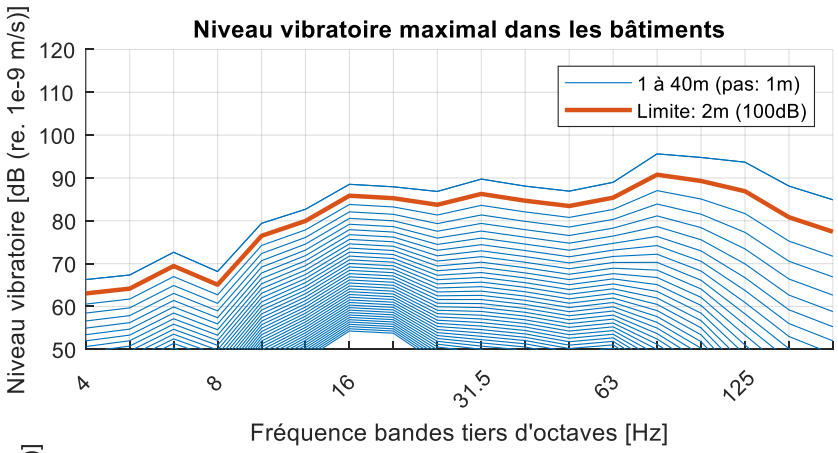


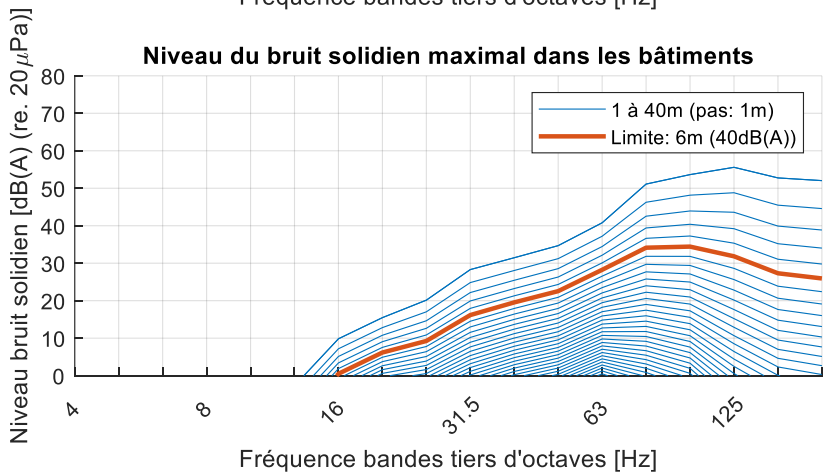


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | 15 km/u | SSC typique + OA (Viaduct)

S1

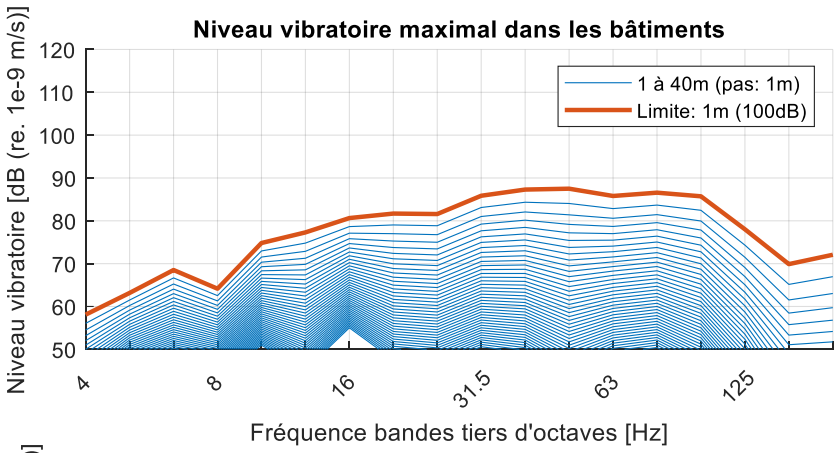


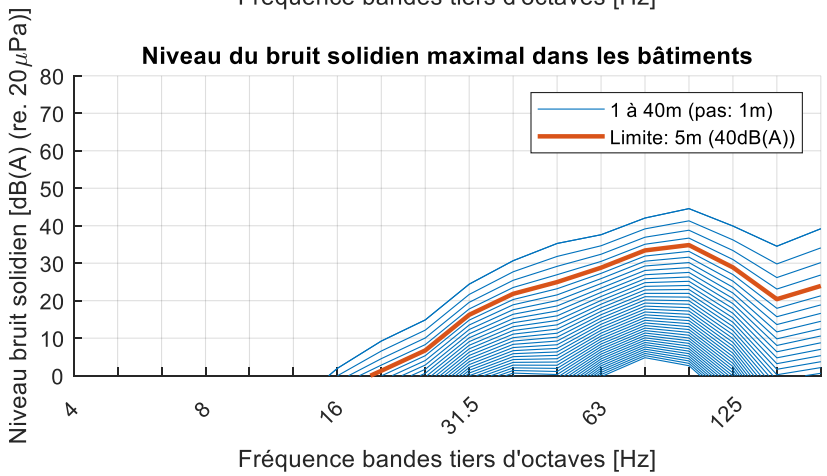


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | 15 km/u | SSC typique + OA (Viaduct)

S2

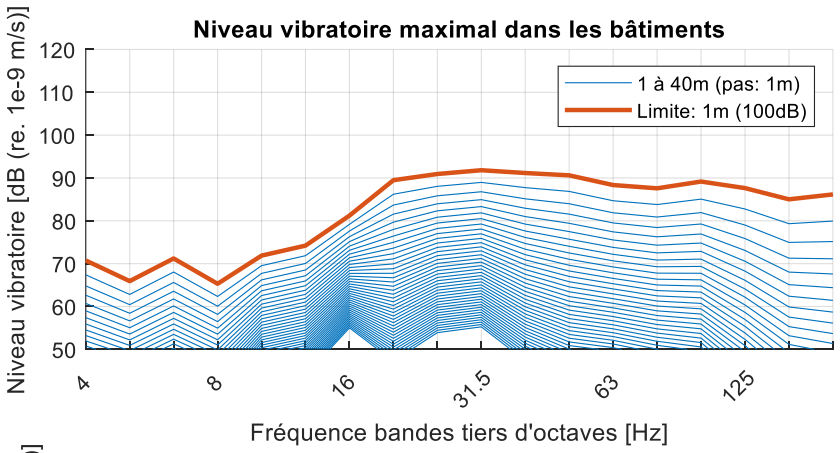


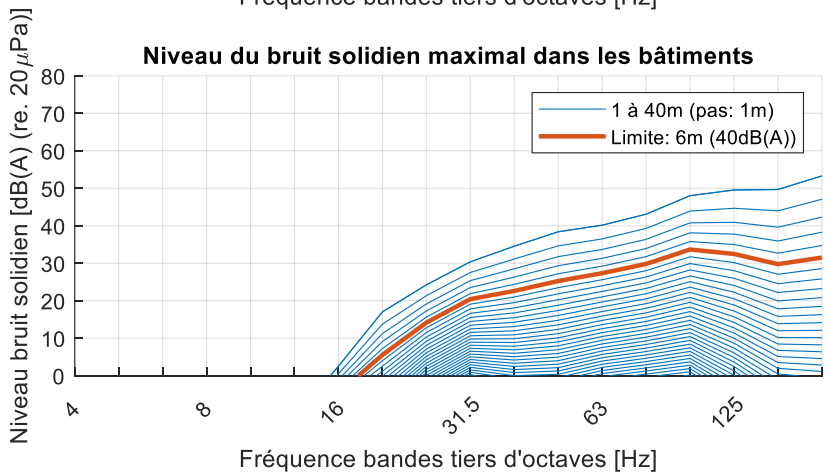


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | 15 km/u | SSC typique + OA (Viaduct)

S3

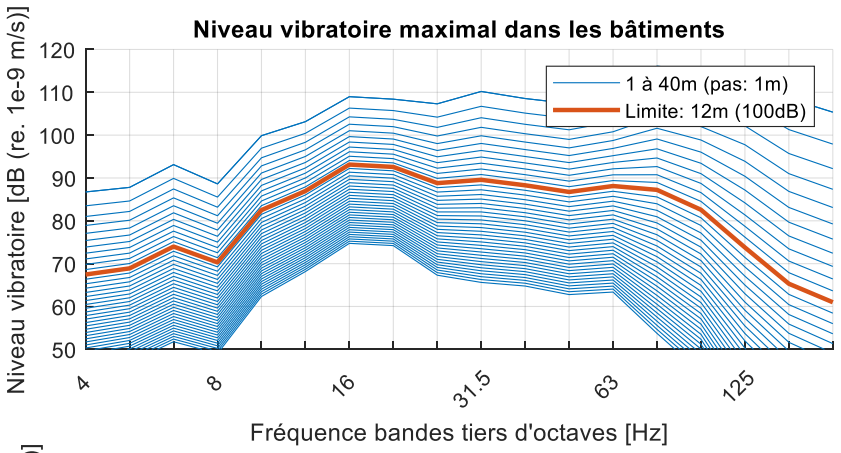


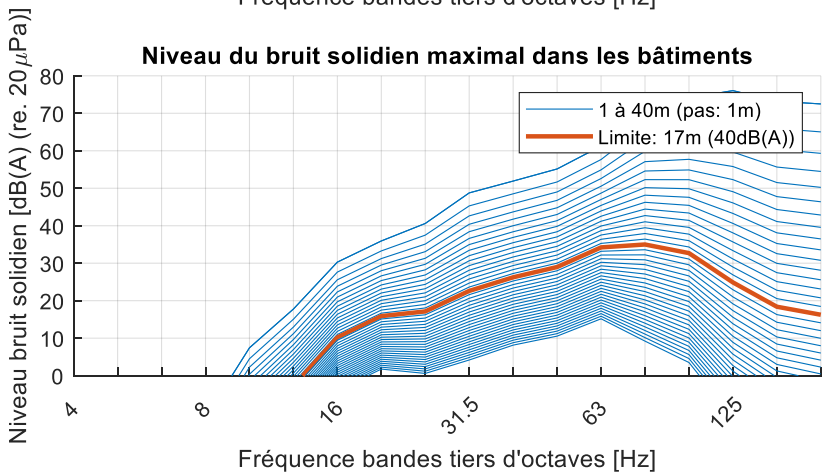


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | Pose classique + App. de voie | 50 km/u | SSC typique + OA (Viaduct)

S1

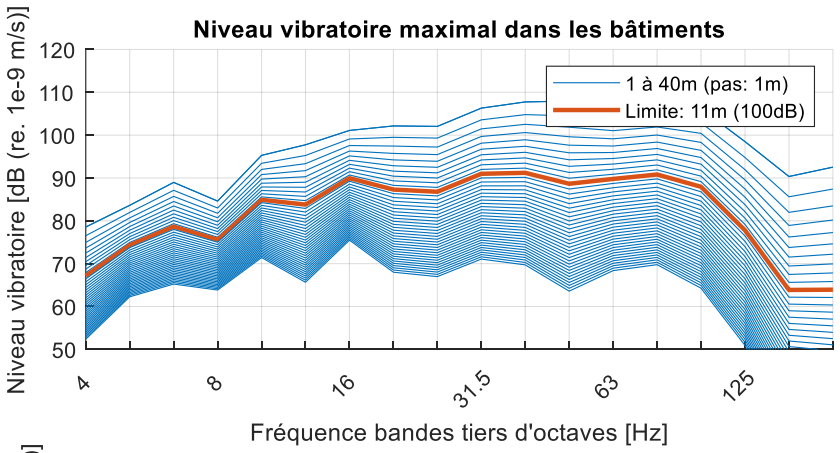


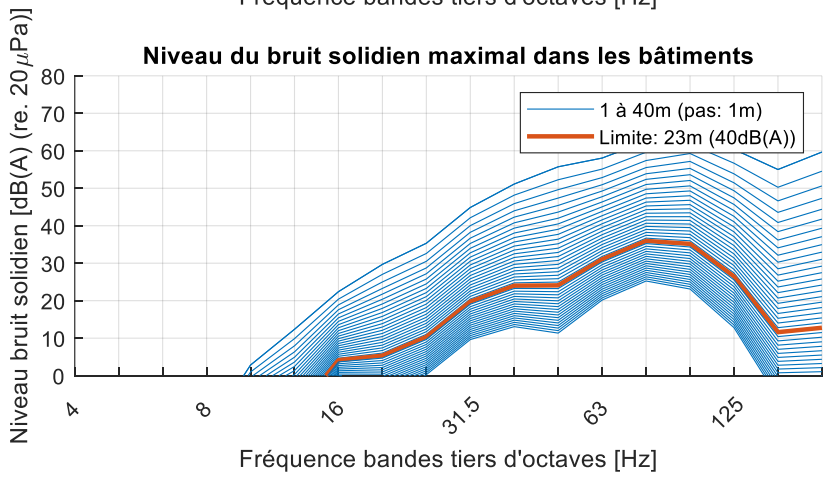


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | Pose classique + App. de voie | 50 km/u | SSC typique + OA (Viaduct)

S2

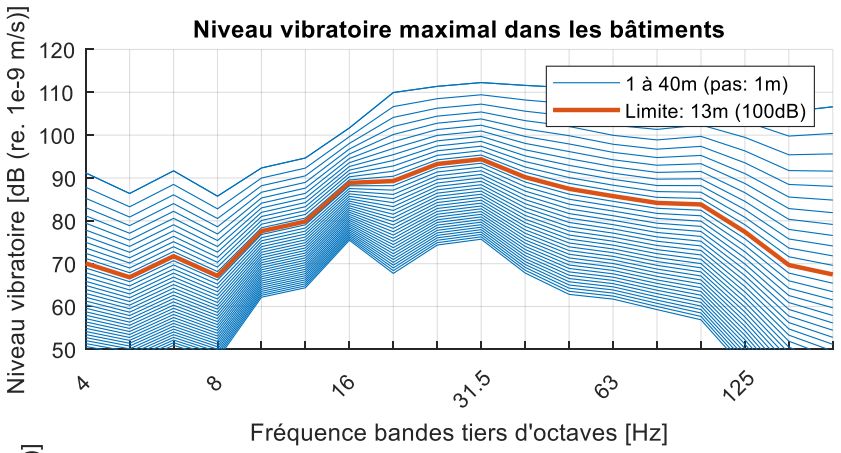


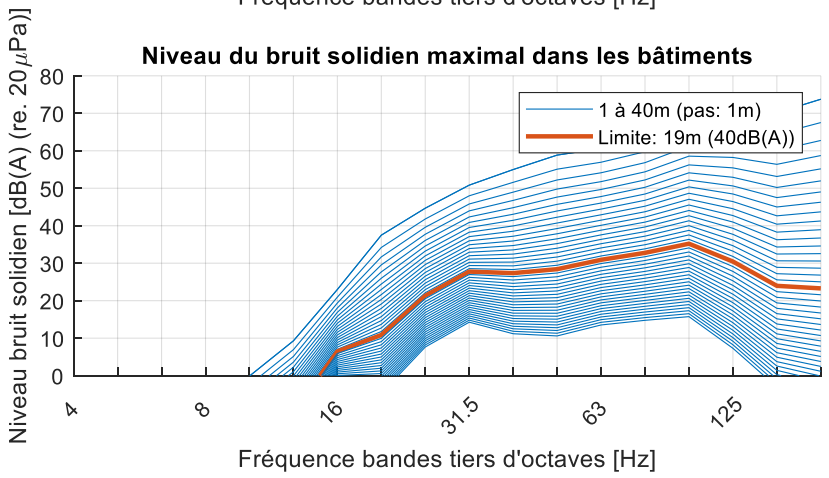


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | Pose classique + App. de voie | 50 km/u | SSC typique + OA (Viaduct)

S3



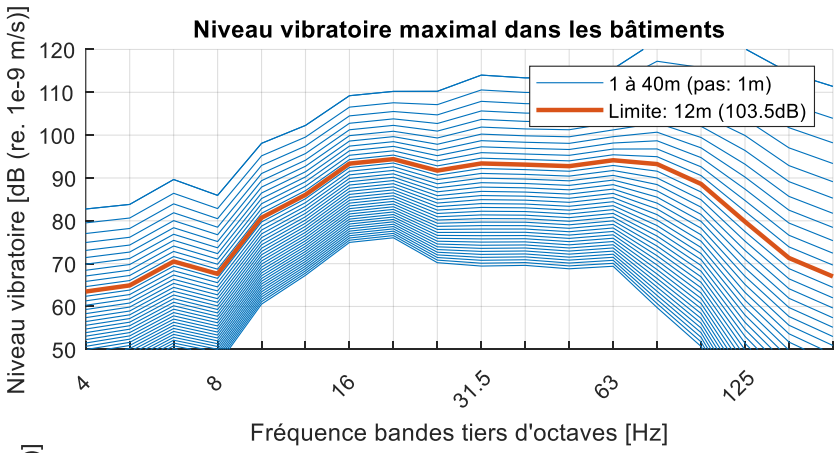


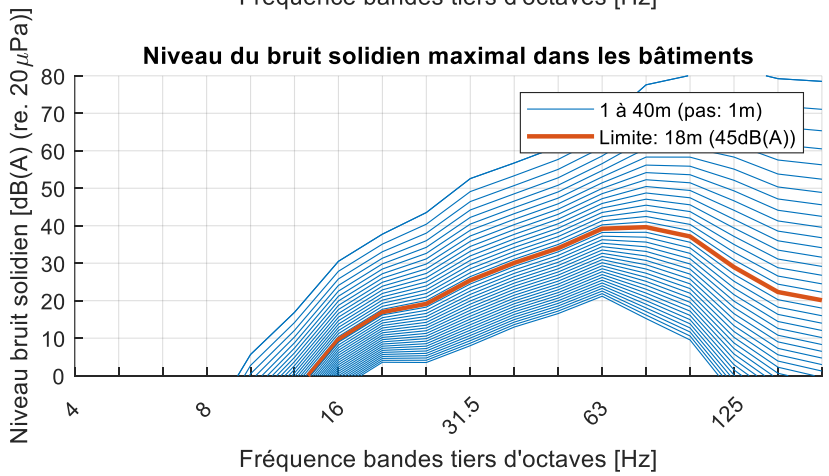
ANNEXE E – RÉSULTATS DE CALCUL « TRACÉ OPTIMISÉ » – ZONE 3 (ZONE MIXTE)

N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | 100 km/u | SSC typique

S1

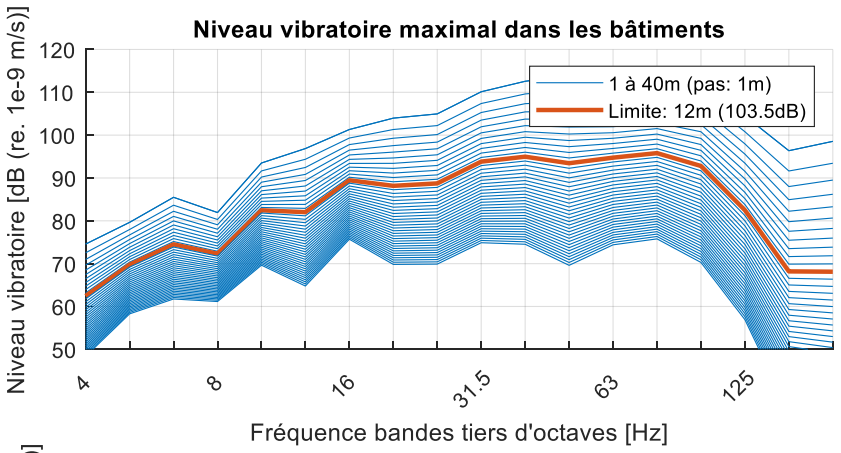


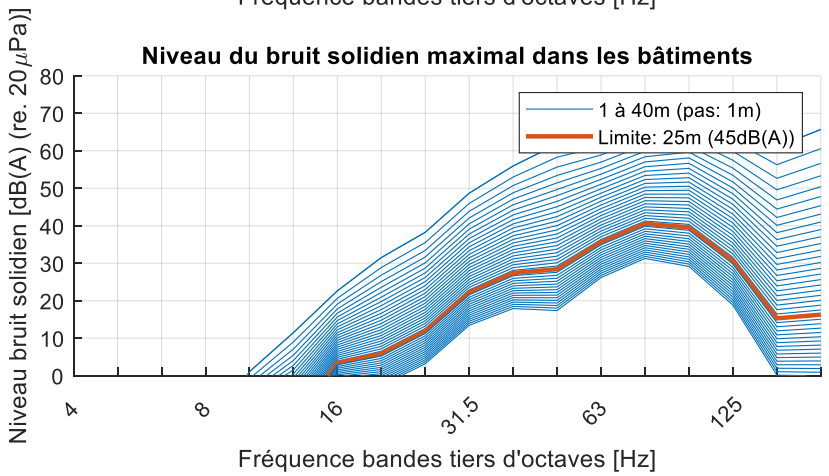


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | 100 km/u | SSC typique

S2

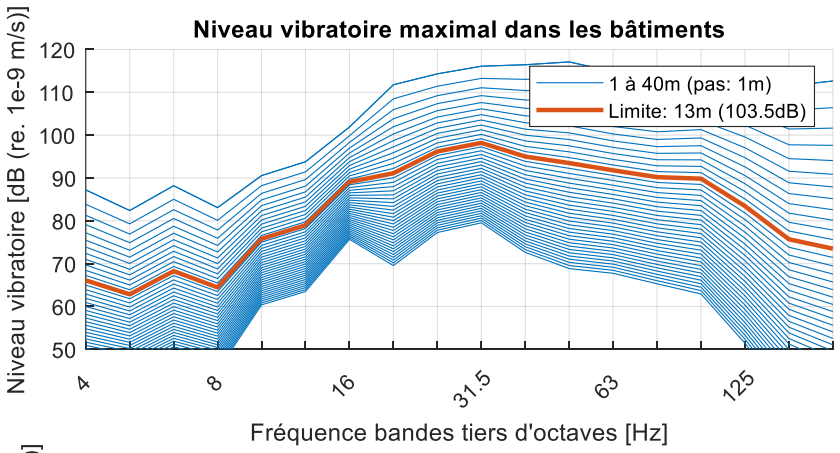


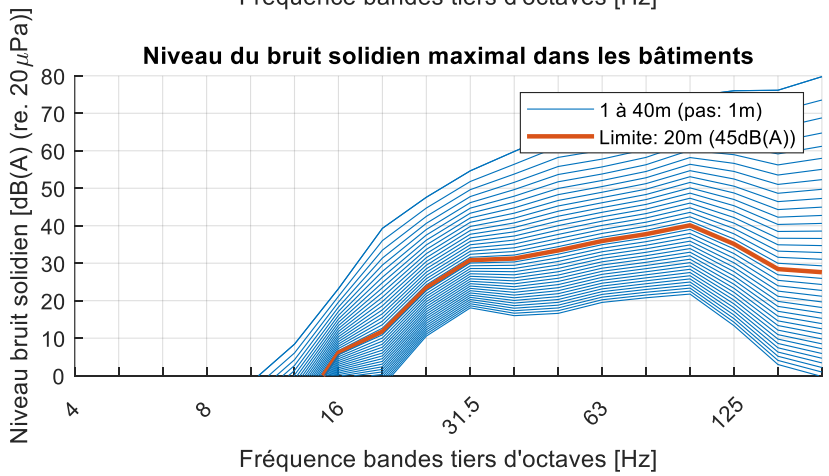


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | 100 km/u | SSC typique

S3

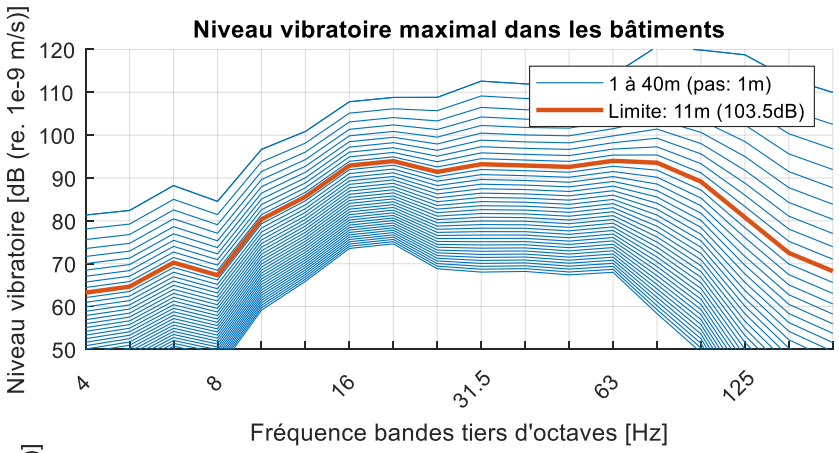


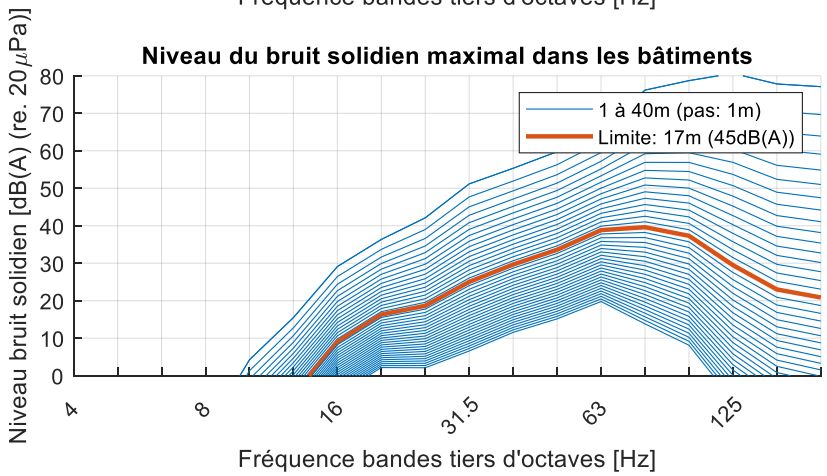


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | 85 km/u | SSC typique

S1

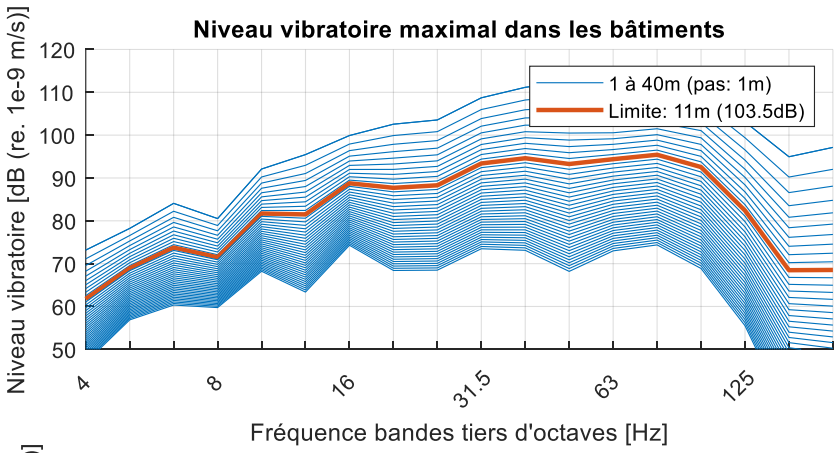


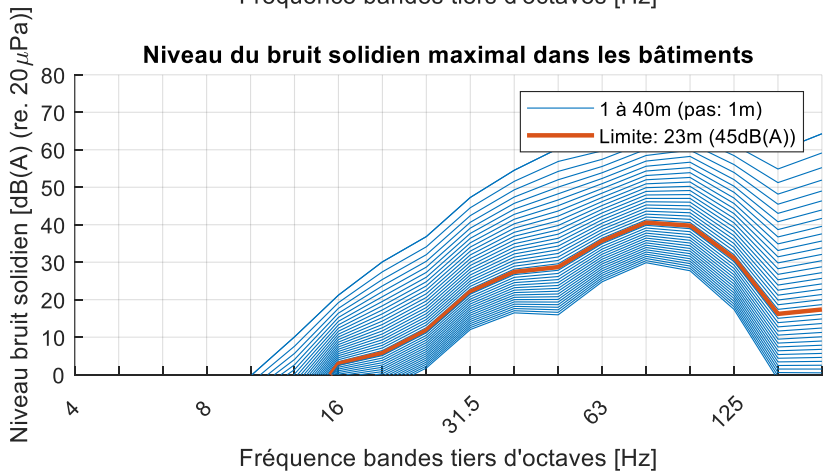


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | 85 km/u | SSC typique

S2

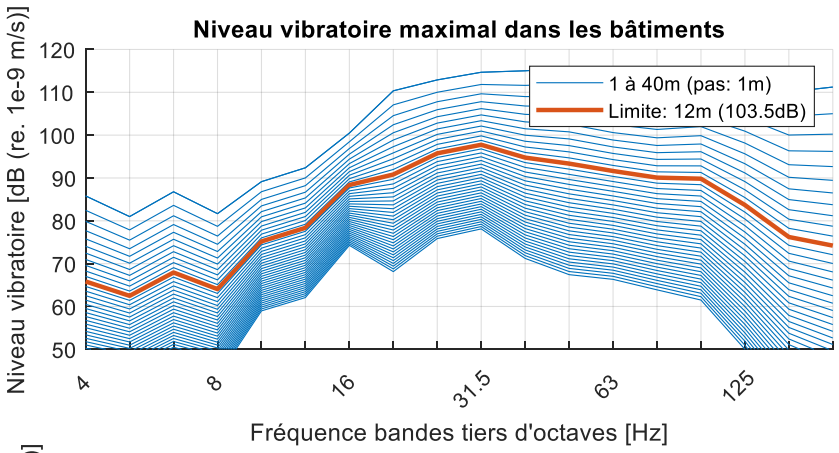


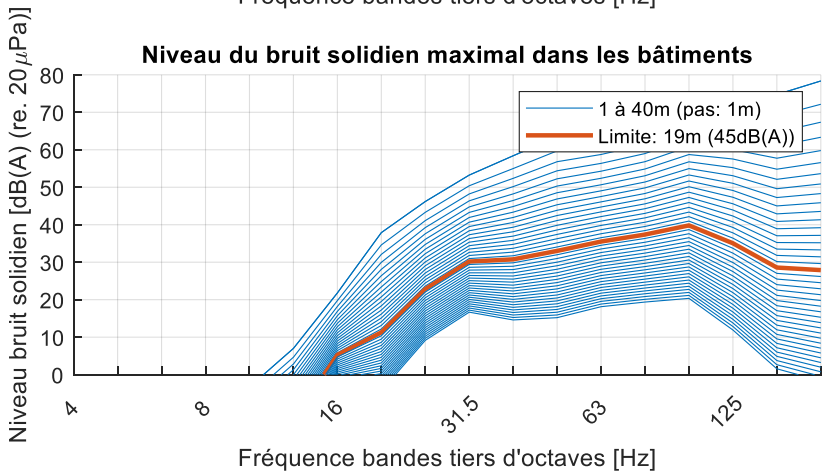


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | 85 km/u | SSC typique

S3

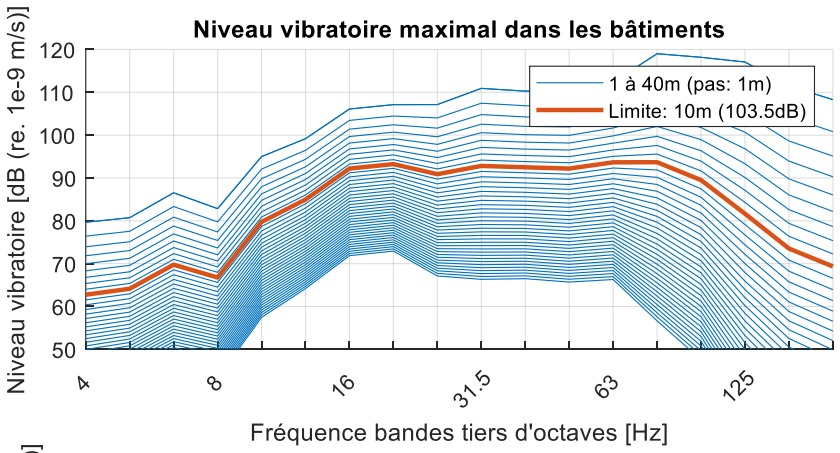


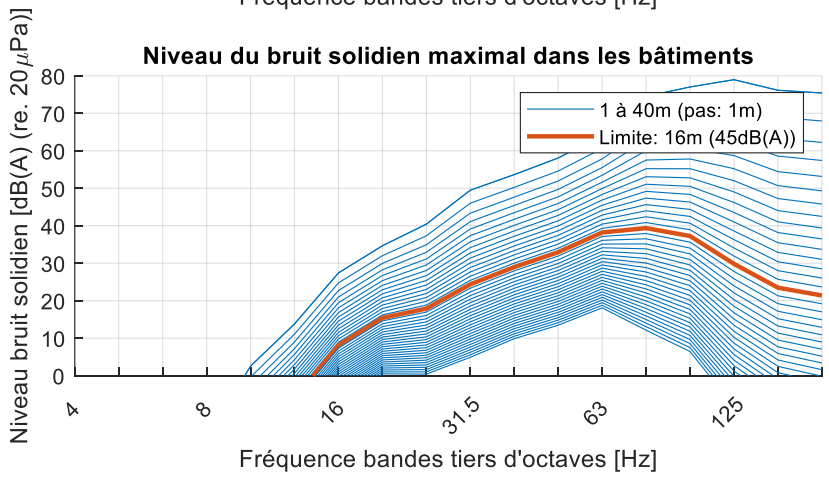


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | 70 km/u | SSC typique

S1

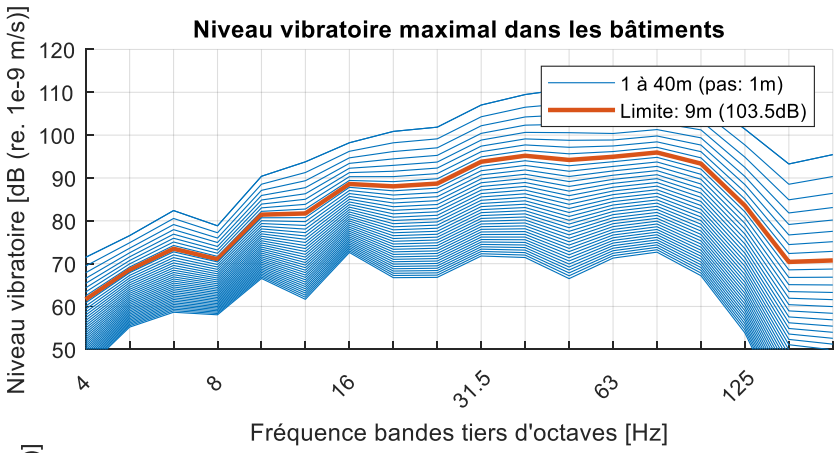


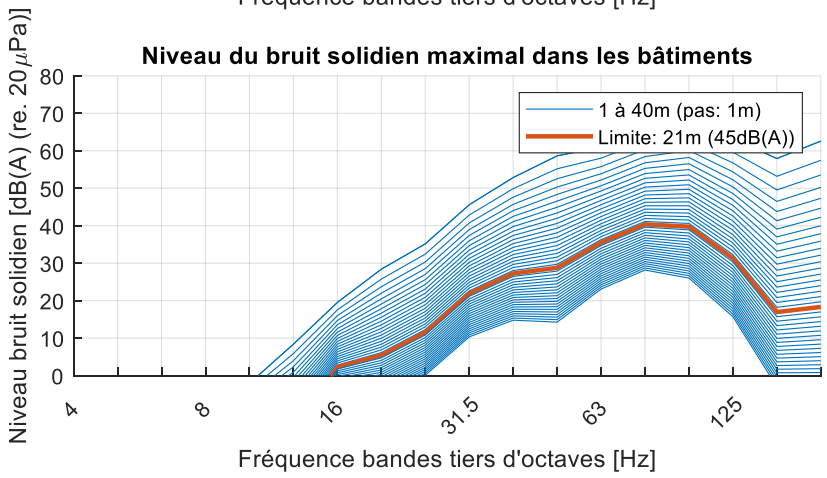


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | 70 km/u | SSC typique

S2

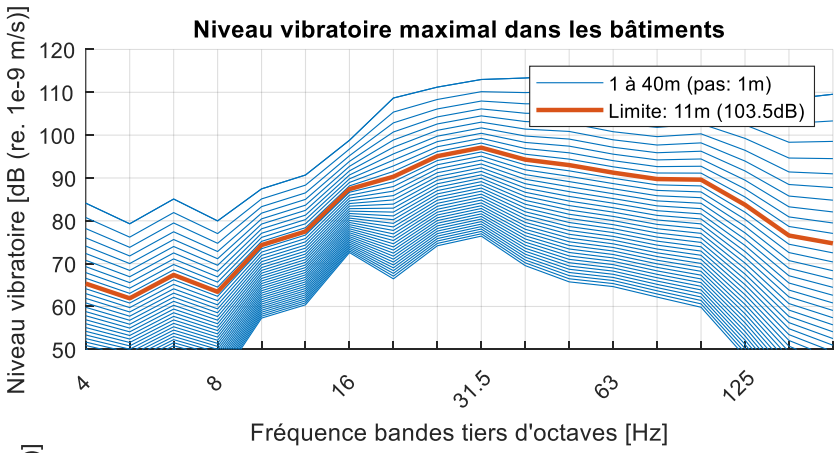


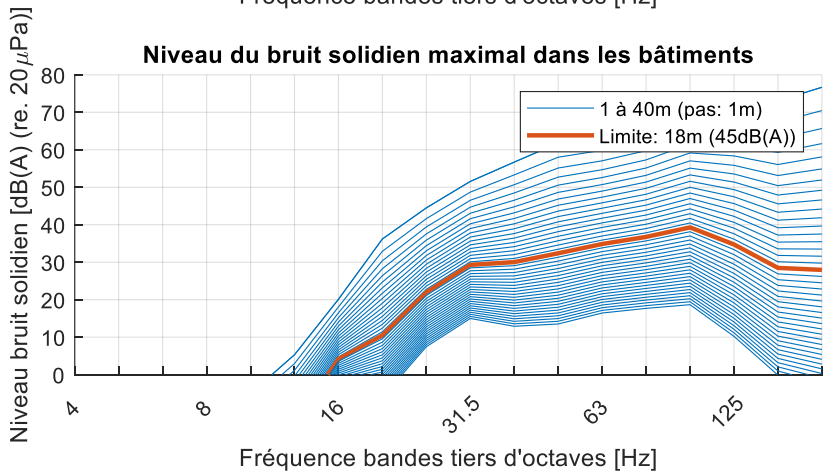


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | 70 km/u | SSC typique

S3

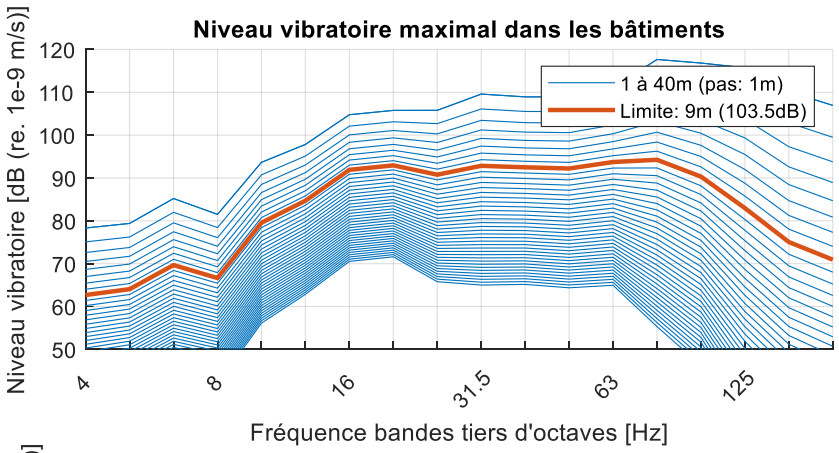


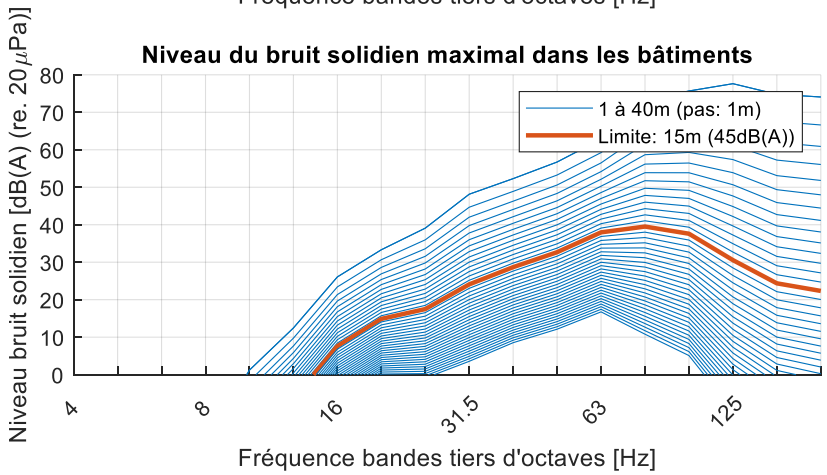


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | 60 km/u | SSC typique

S1

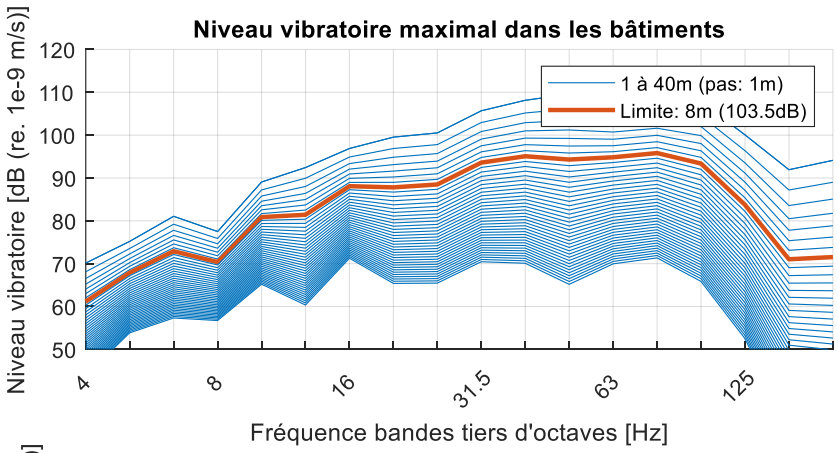


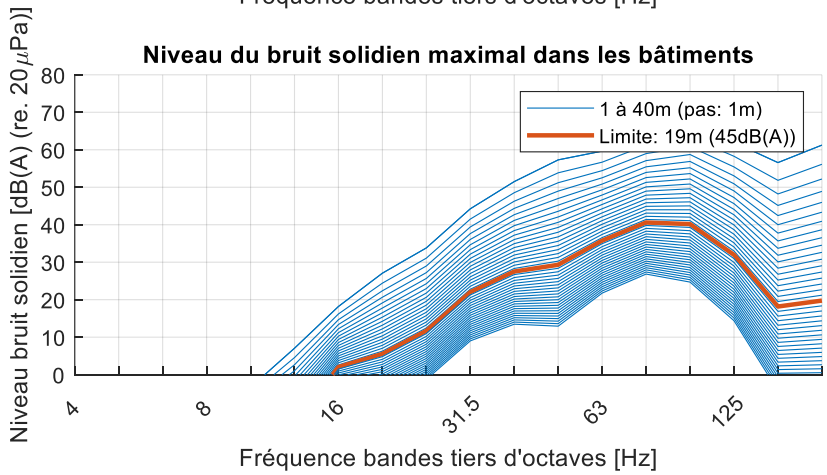


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | 60 km/u | SSC typique

S2

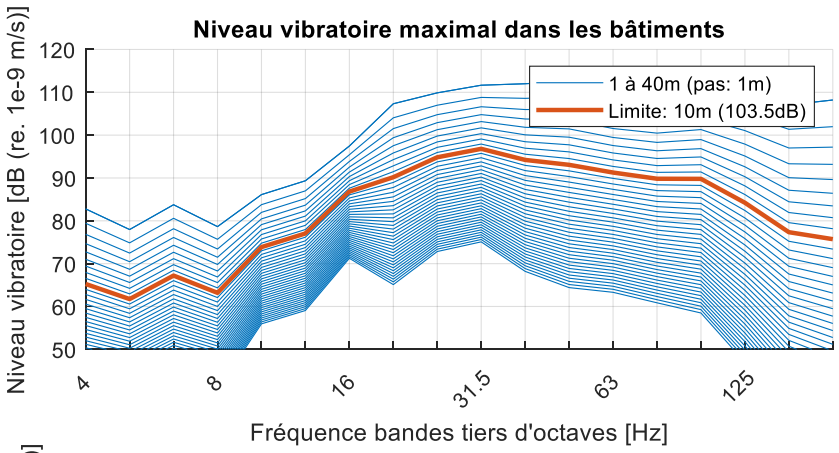


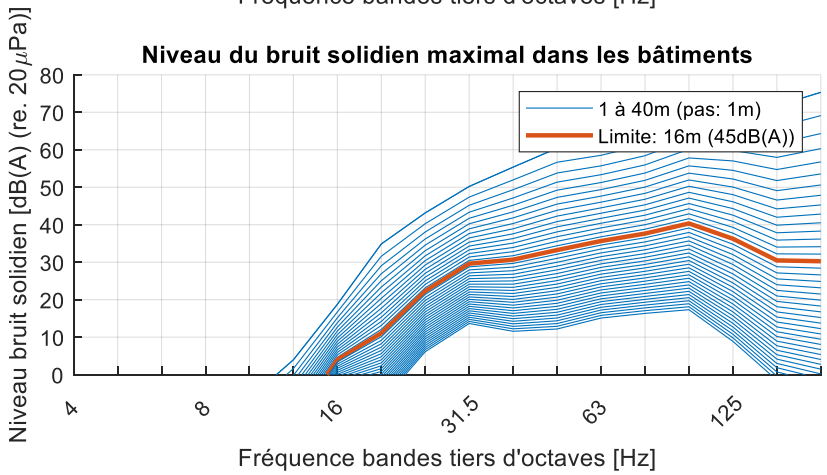


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | 60 km/u | SSC typique

S3

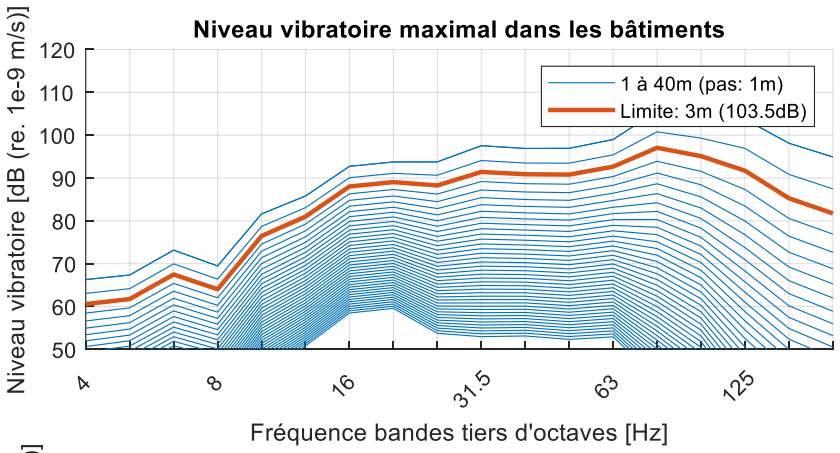


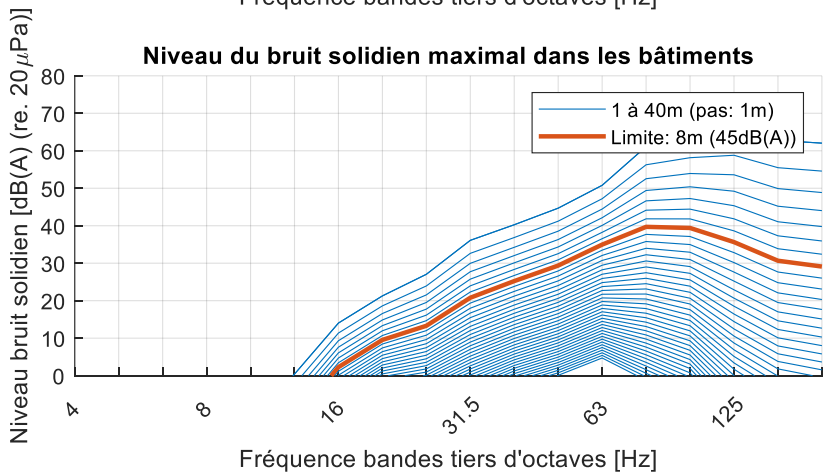


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | 15 km/u | SSC typique

S1

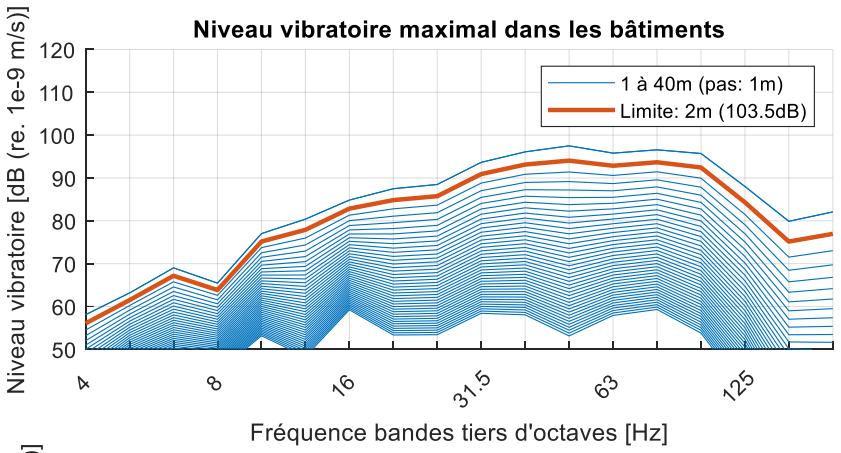


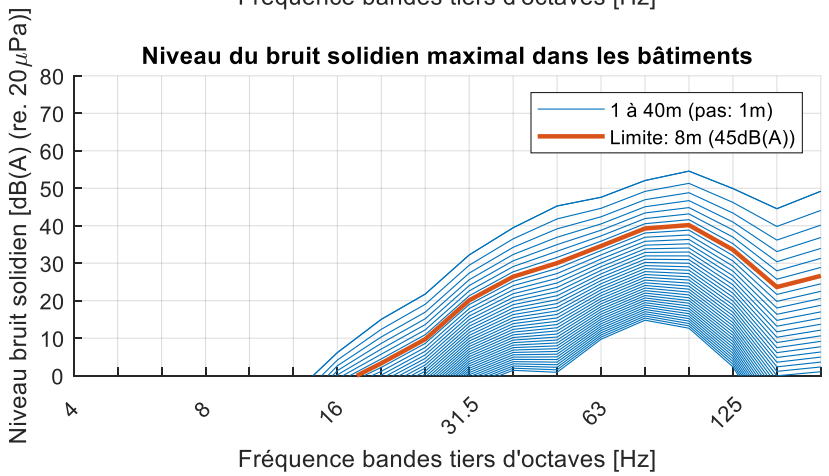


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | 15 km/u | SSC typique

S2

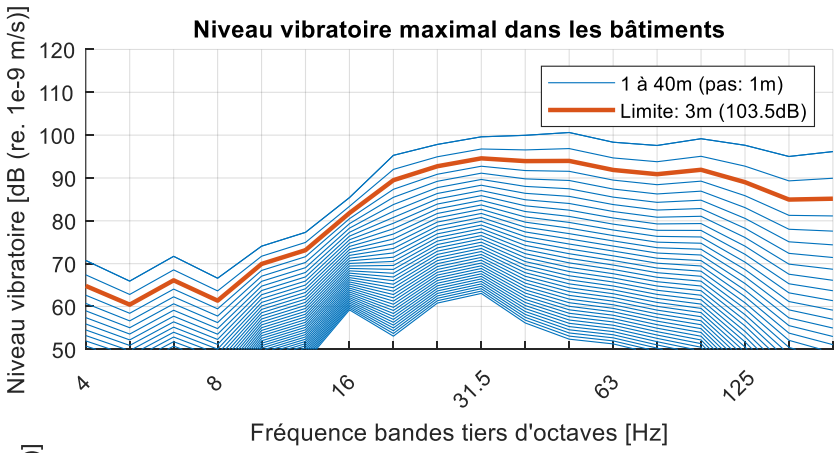


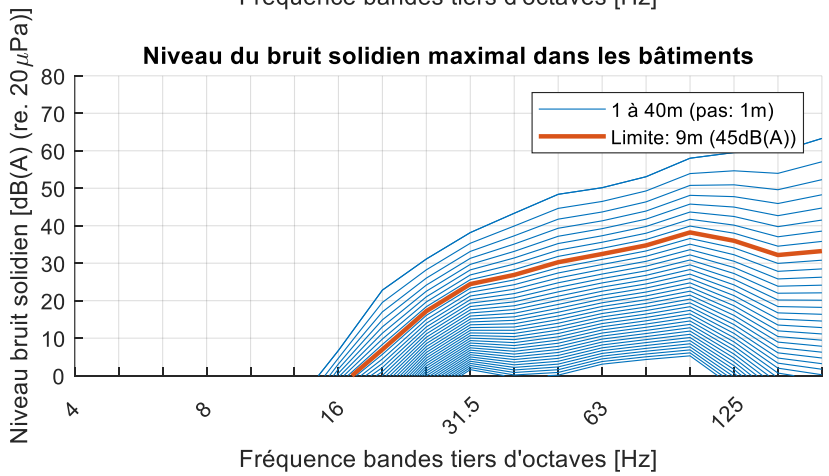


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | 15 km/u | SSC typique

S3

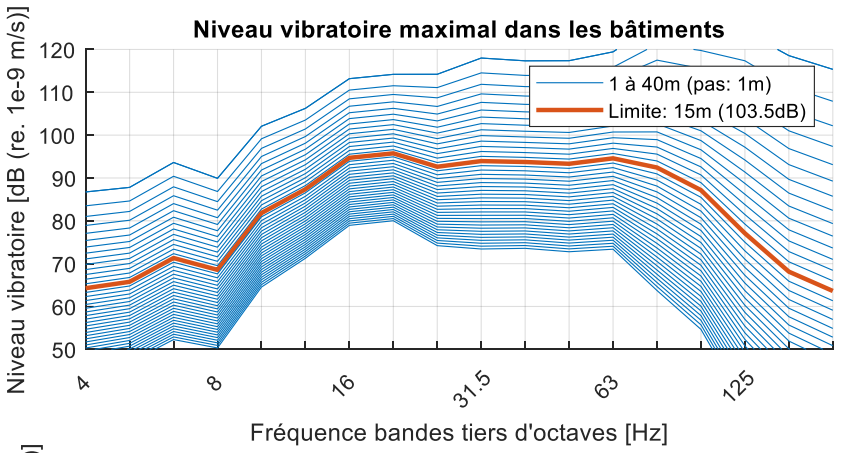


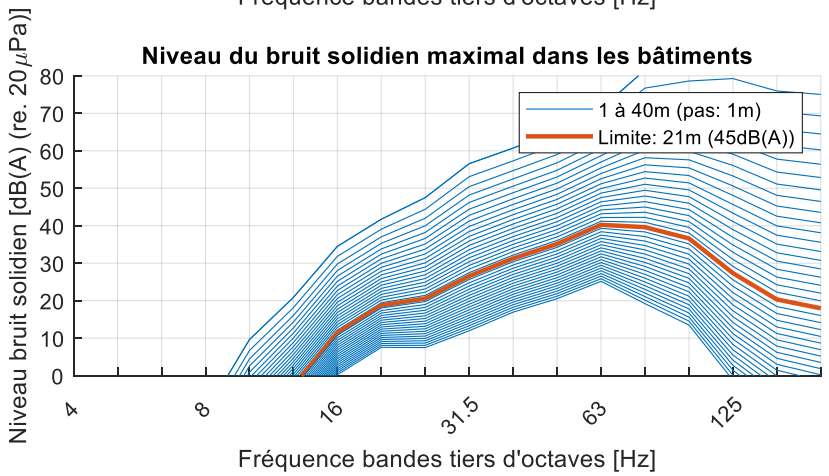


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | Pose classique + App. de voie | 50 km/u | SSC typique

S1

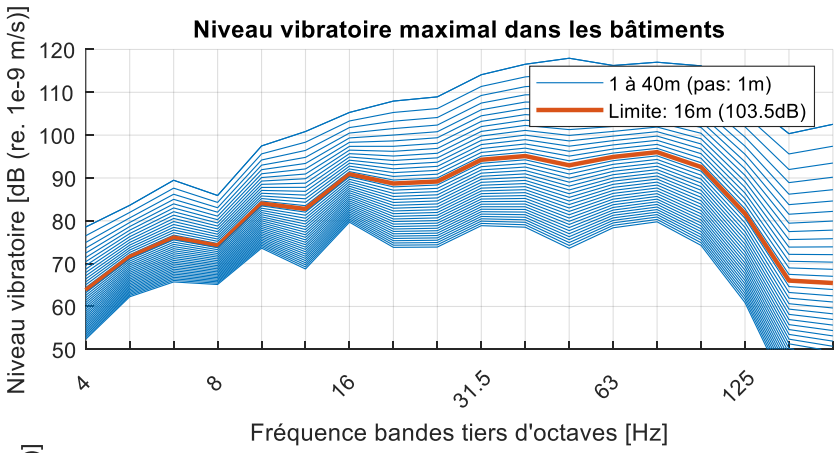


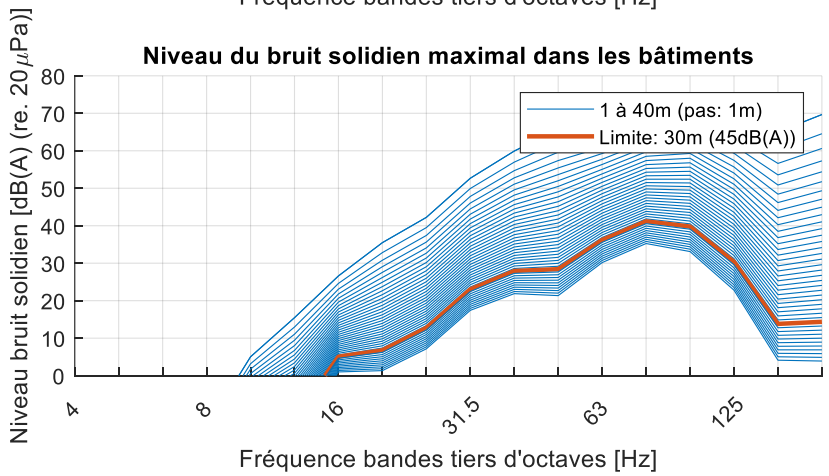


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | Pose classique + App. de voie | 50 km/u | SSC typique

S2

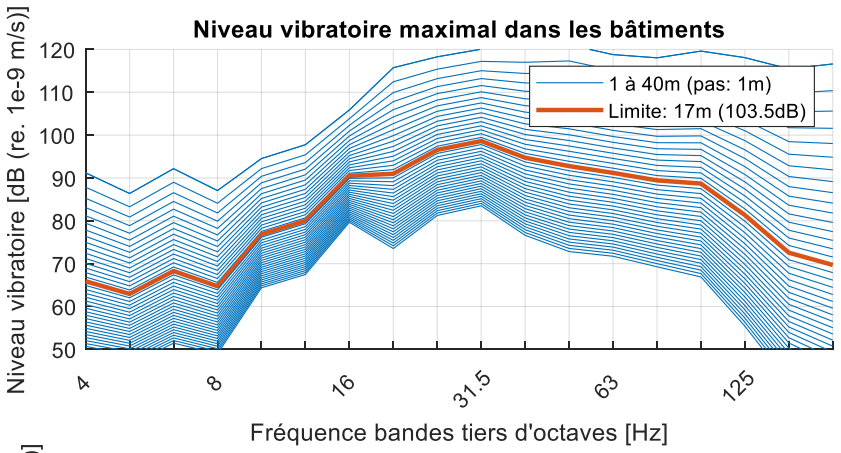


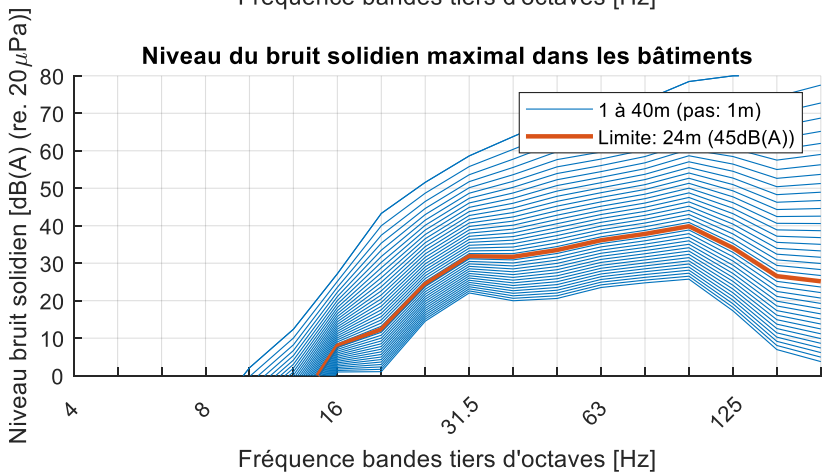


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | Pose classique + App. de voie | 50 km/u | SSC typique

S3

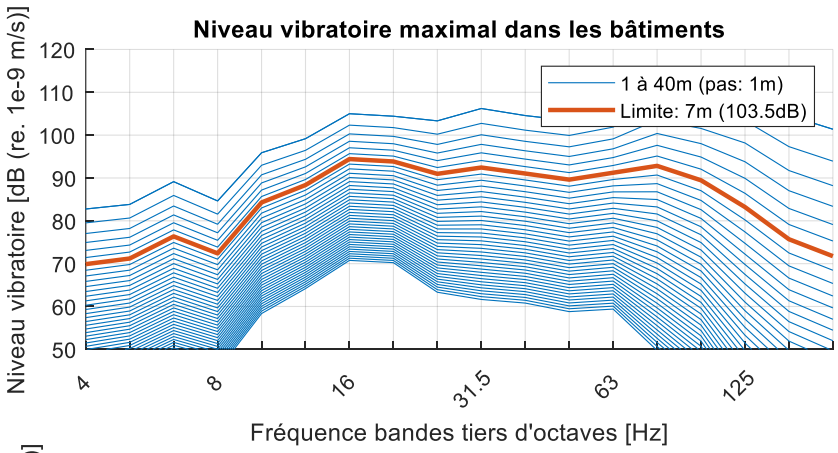


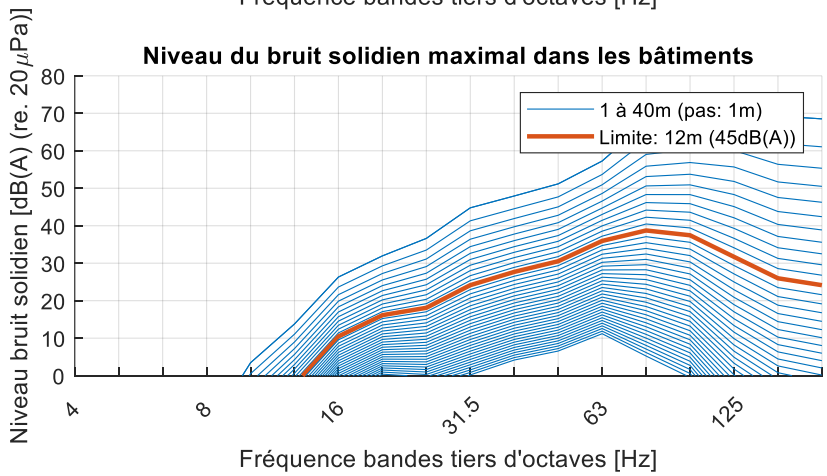


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | 100 km/u | SSC typique + OA (Viaduct)

S1

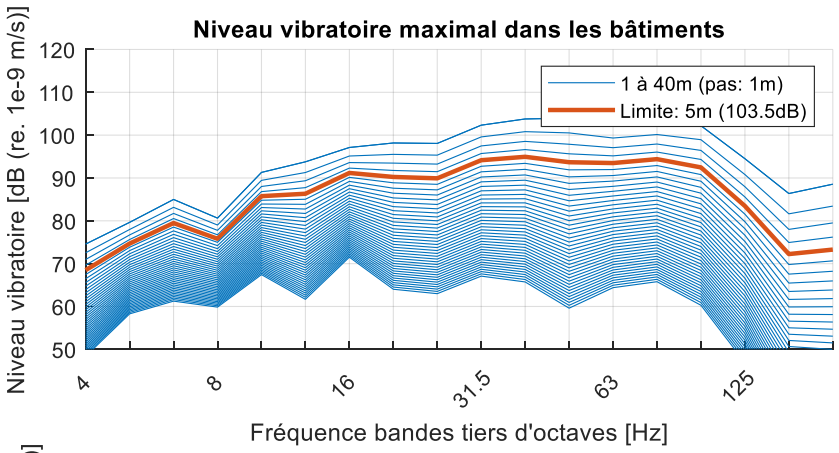


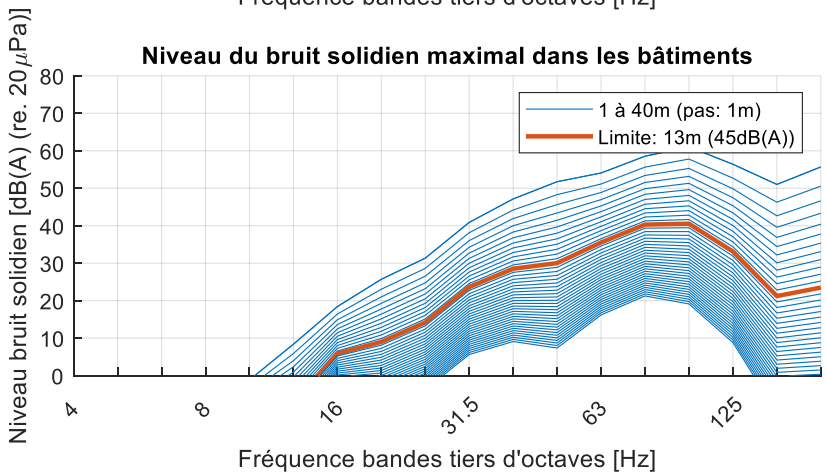


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | 100 km/u | SSC typique + OA (Viaduct)

S2

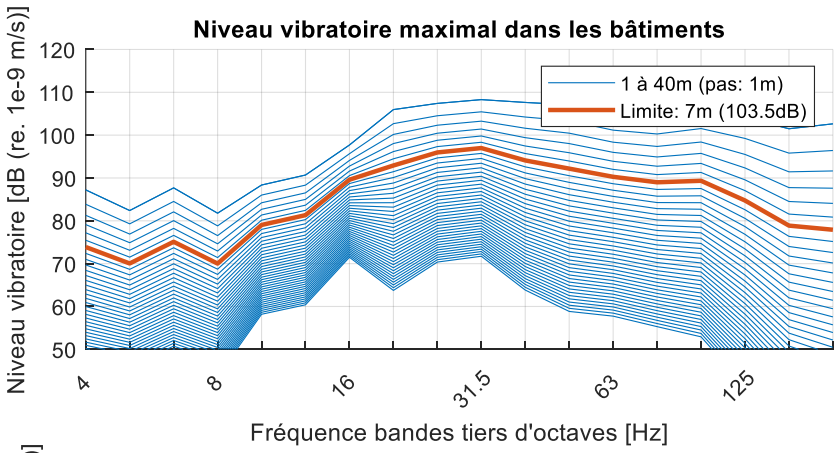


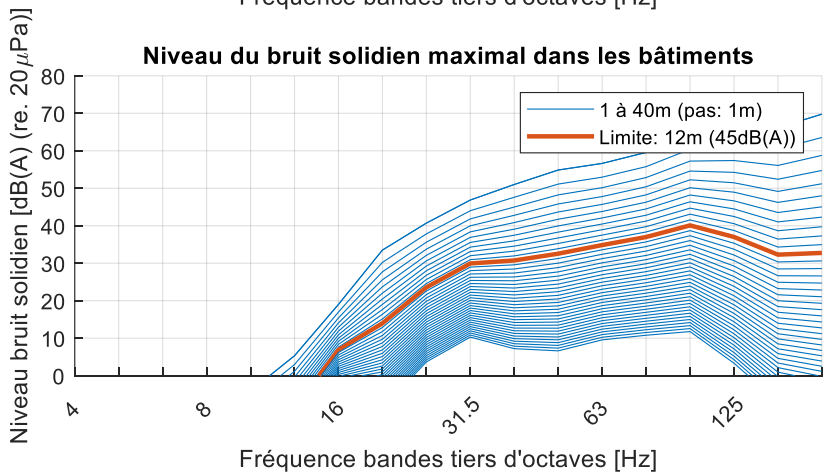


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | 100 km/u | SSC typique + OA (Viaduct)

S3

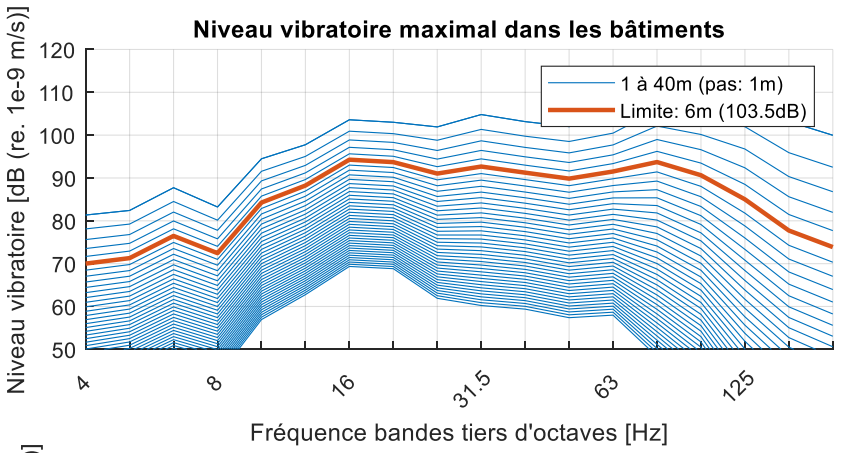


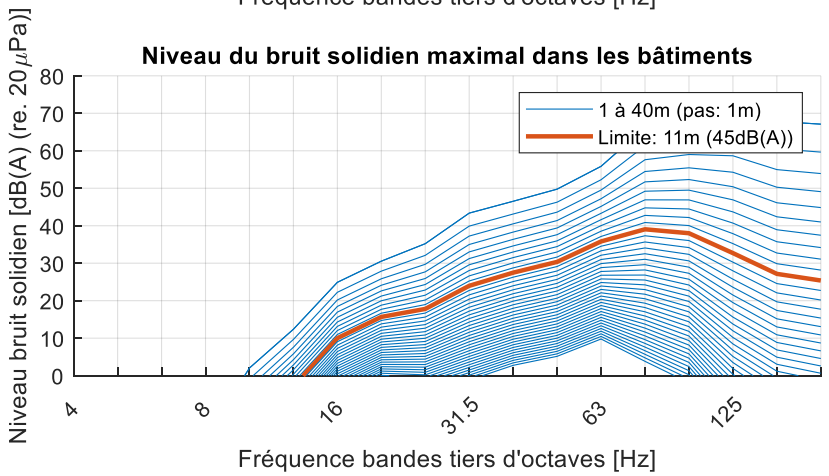


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | 85 km/u | SSC typique + OA (Viaduct)

S1

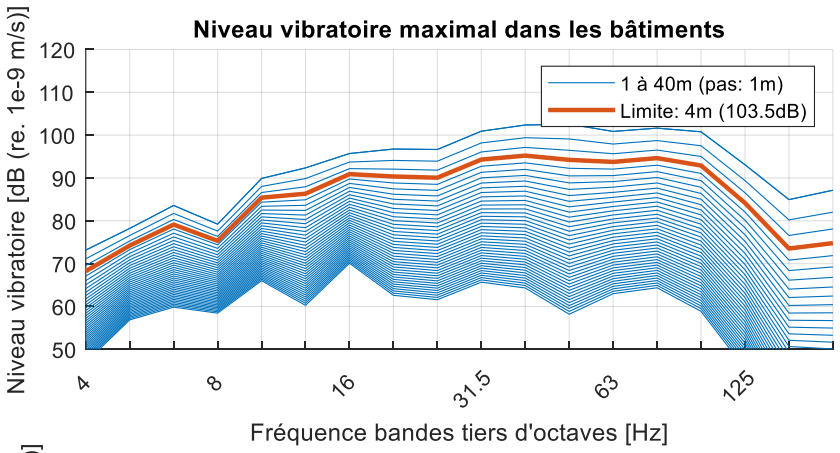


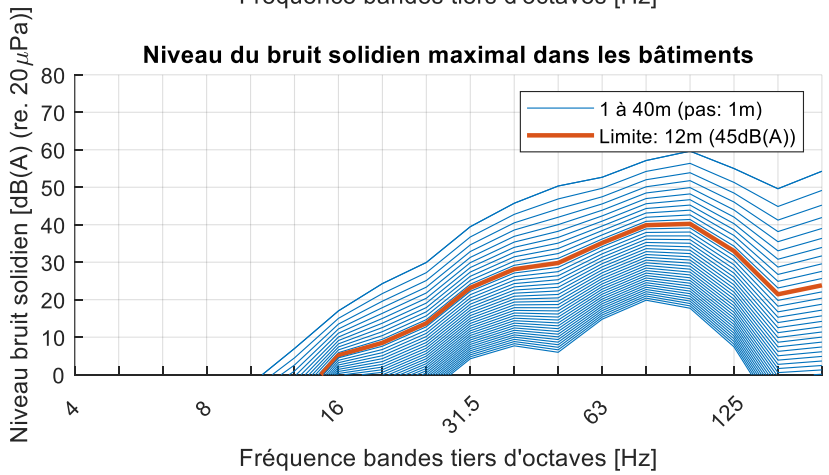


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | 85 km/u | SSC typique + OA (Viaduct)

S2

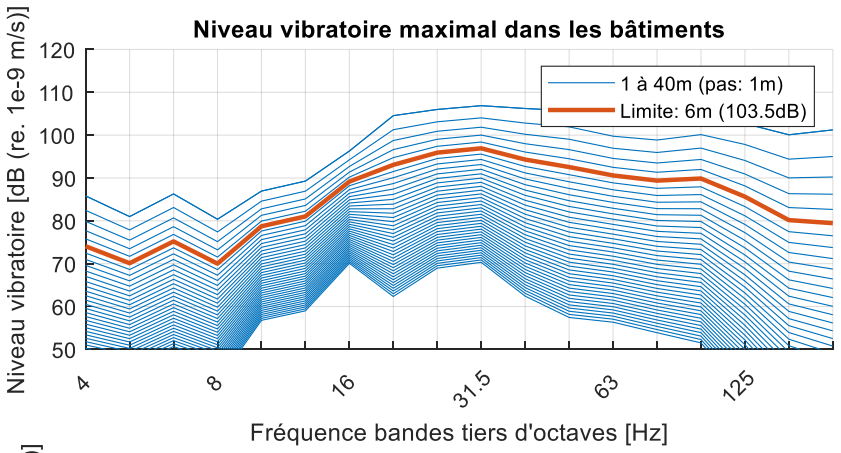


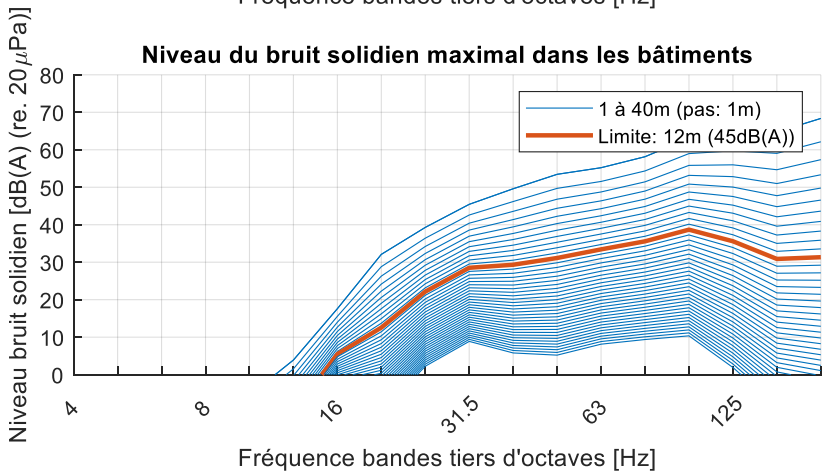


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | 85 km/u | SSC typique + OA (Viaduct)

S3

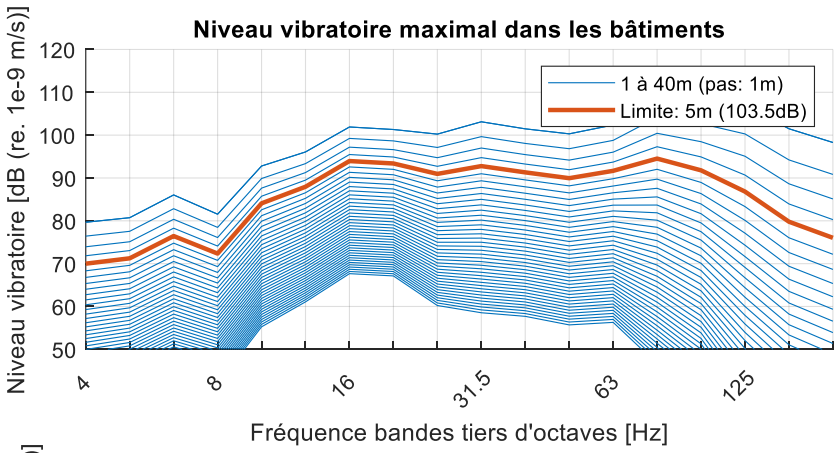


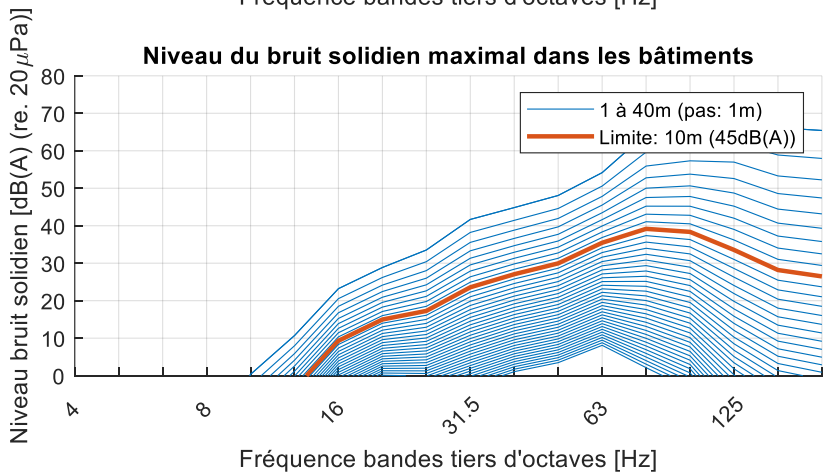


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | 70 km/u | SSC typique + OA (Viaduct)

S1

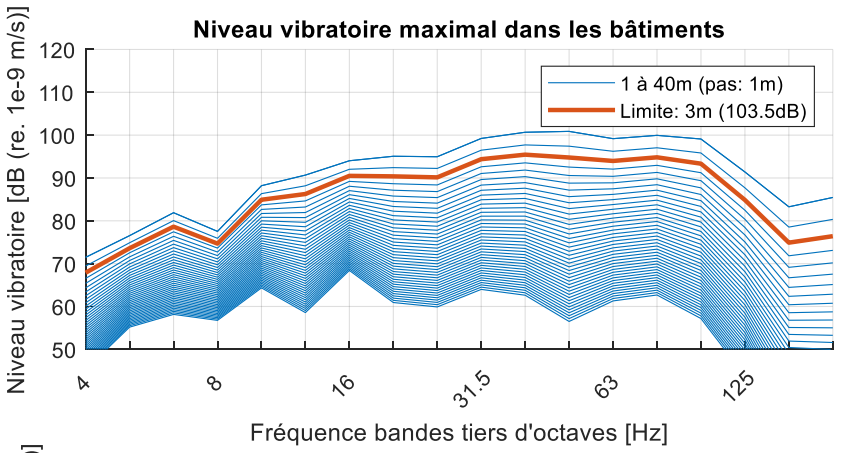


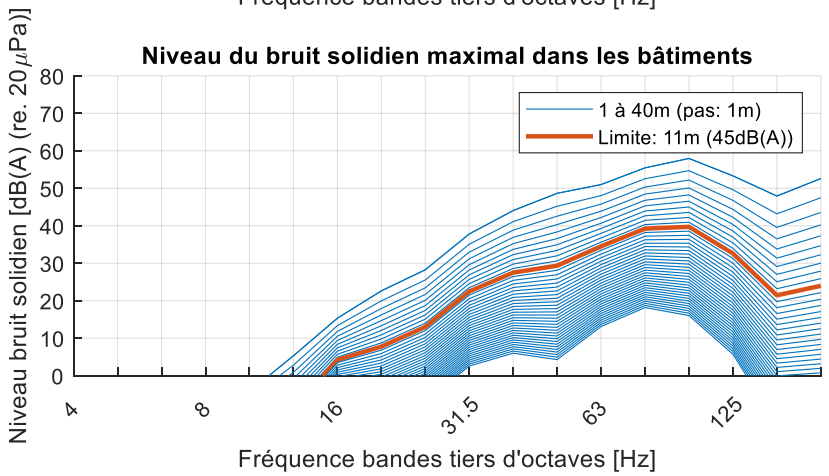


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | 70 km/u | SSC typique + OA (Viaduct)

S2

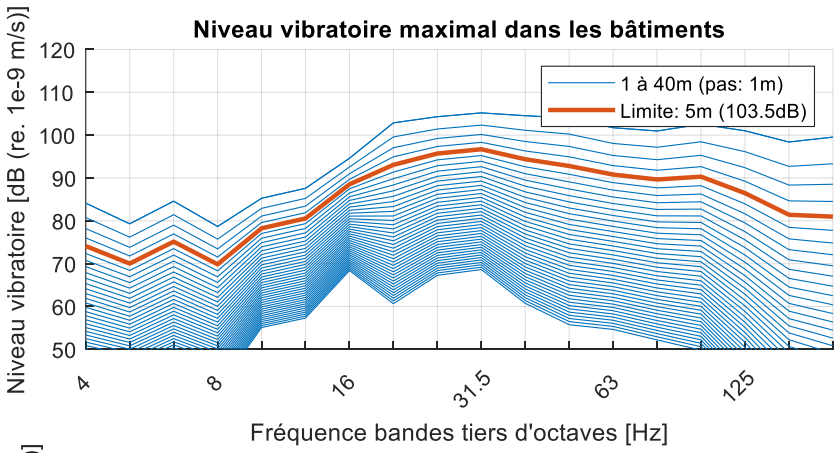


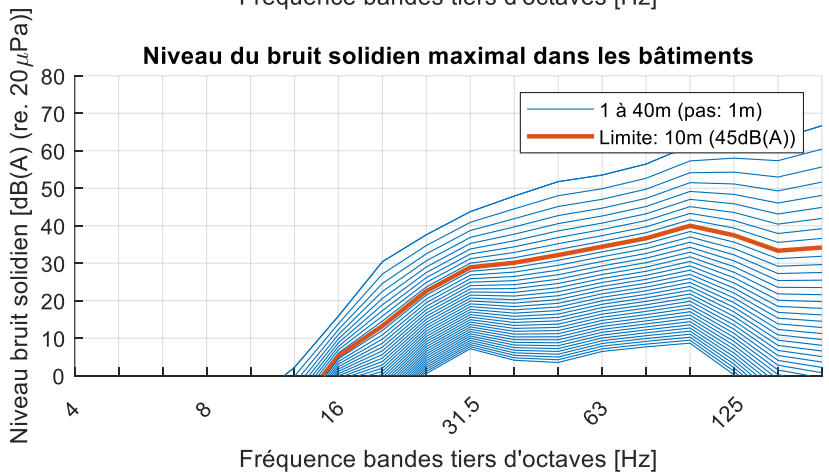


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | 70 km/u | SSC typique + OA (Viaduct)

S3

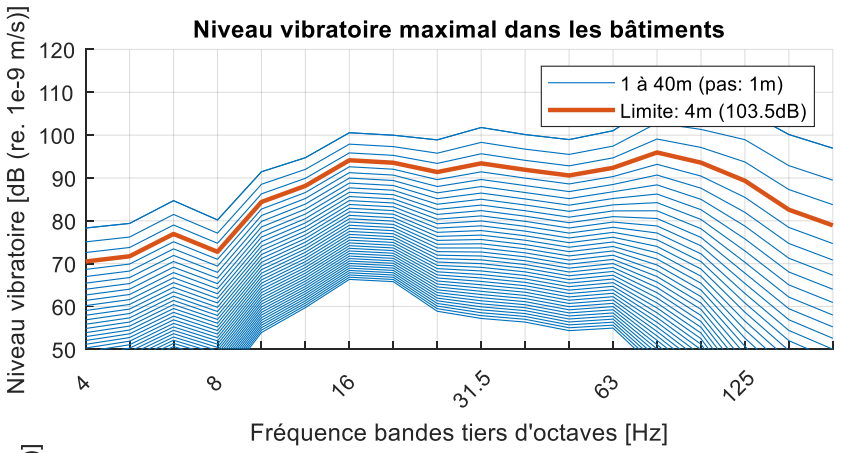


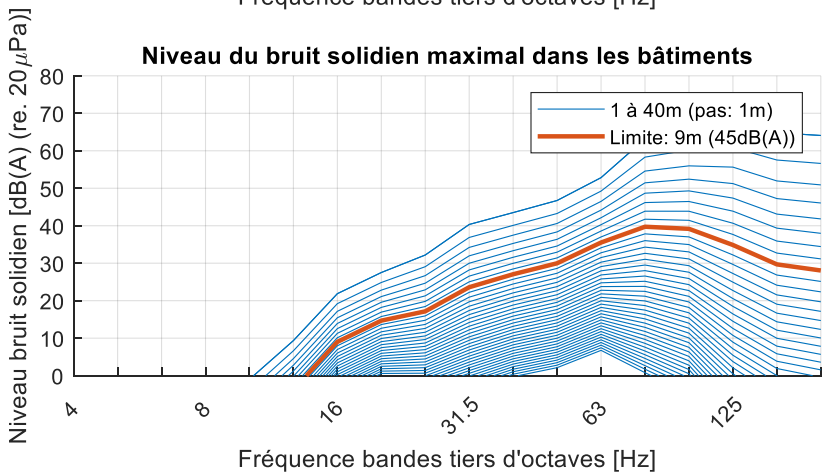


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | 60 km/u | SSC typique + OA (Viaduct)

S1

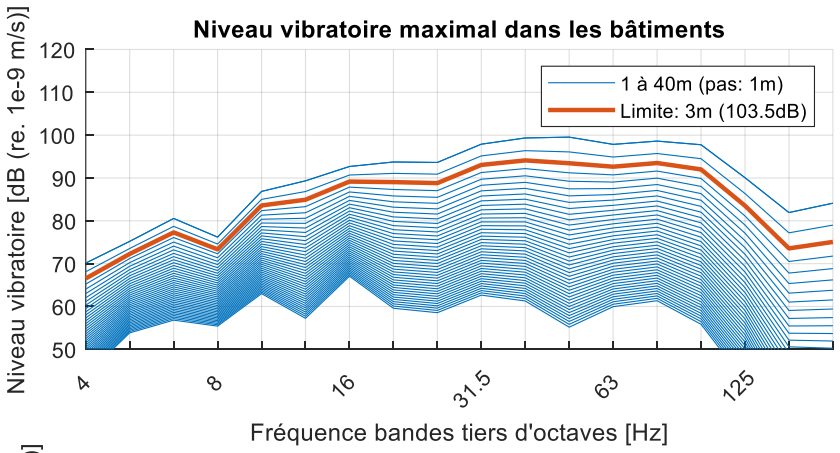


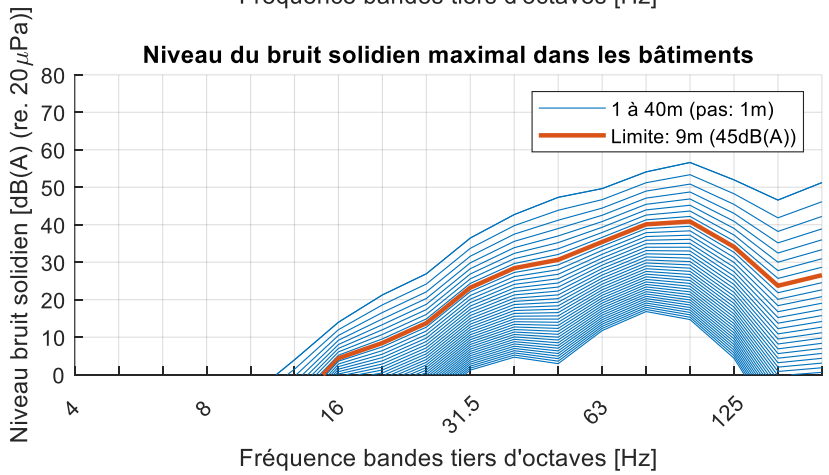


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | 60 km/u | SSC typique + OA (Viaduct)

S2

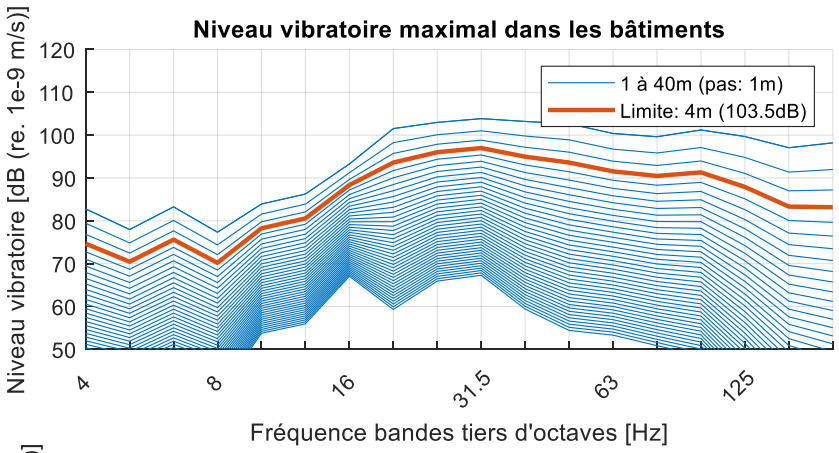


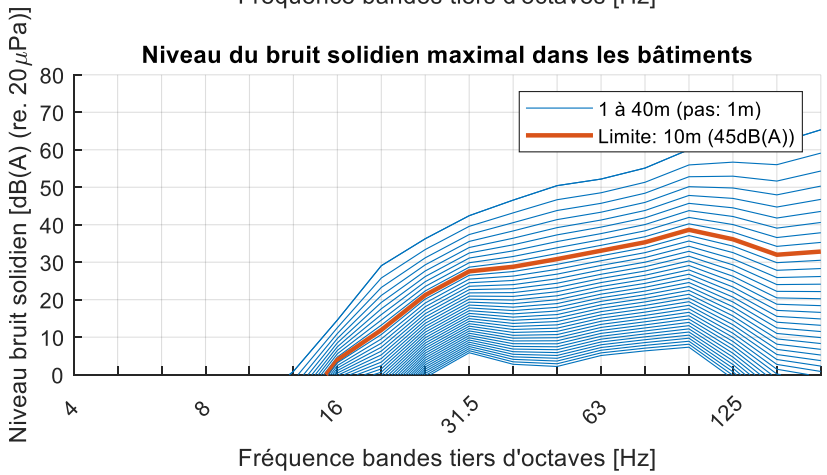


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | 60 km/u | SSC typique + OA (Viaduct)

S3

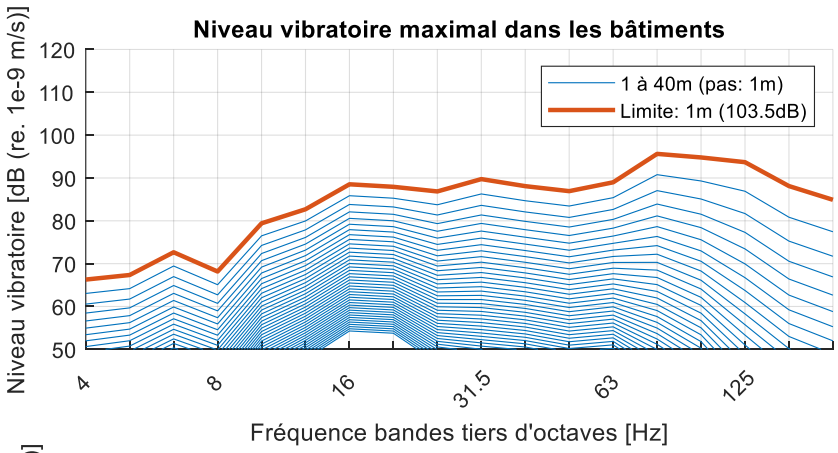


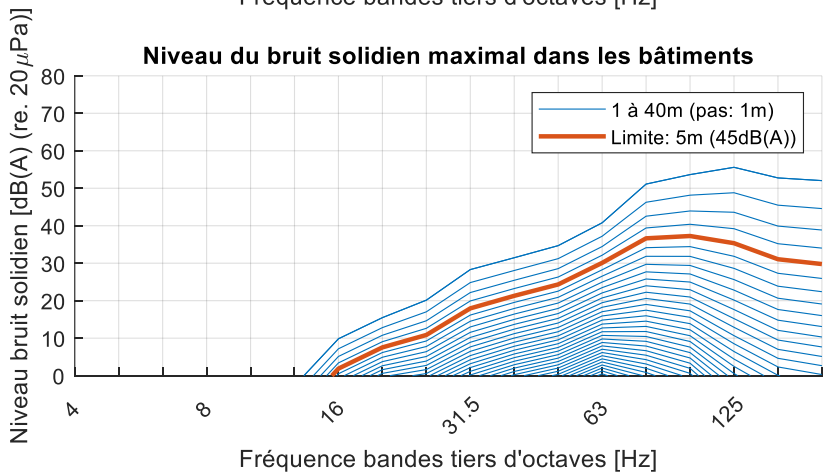


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | 15 km/u | SSC typique + OA (Viaduct)

S1

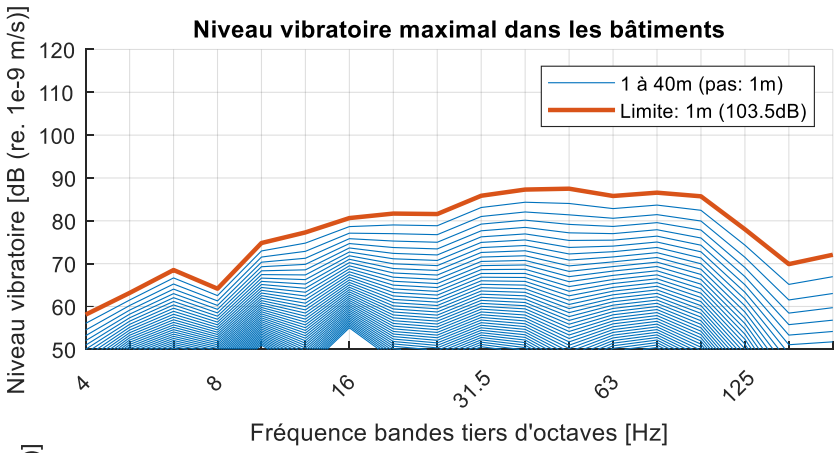


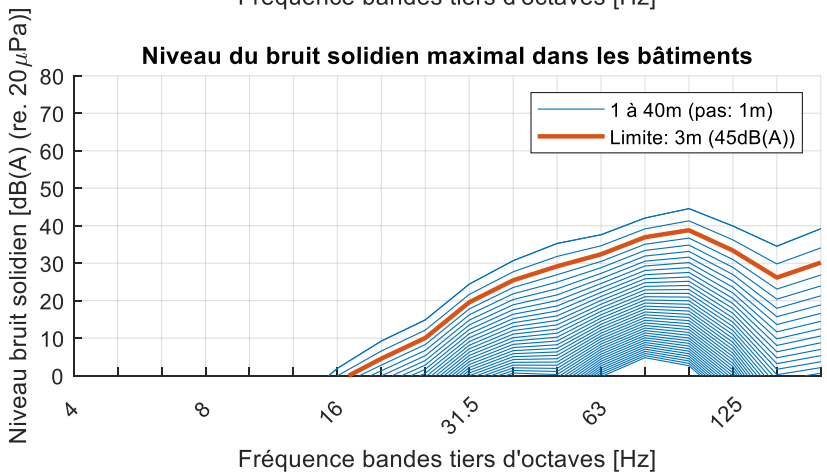


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | 15 km/u | SSC typique + OA (Viaduct)

S2

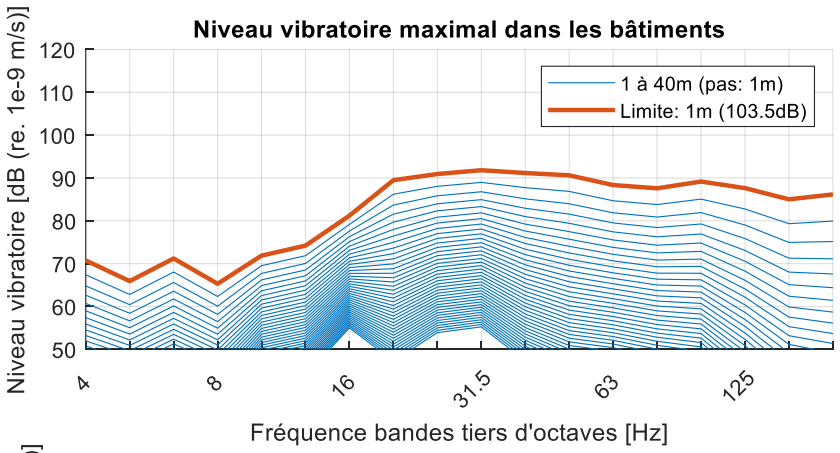


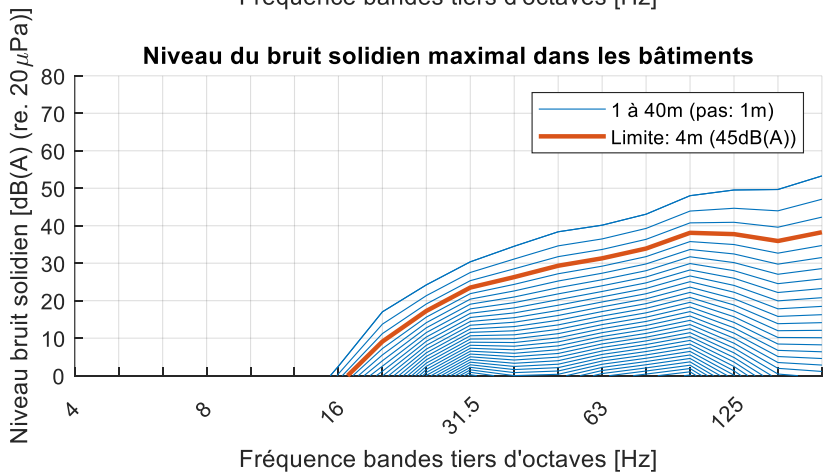


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | 15 km/u | SSC typique + OA (Viaduct)

S3

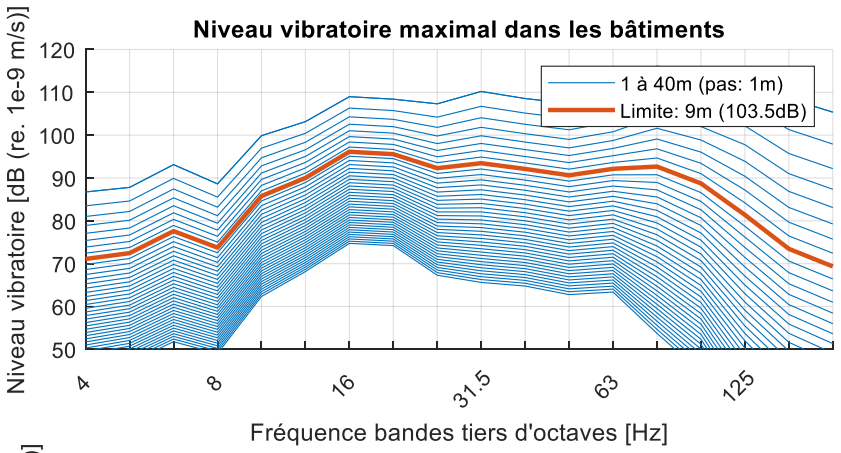


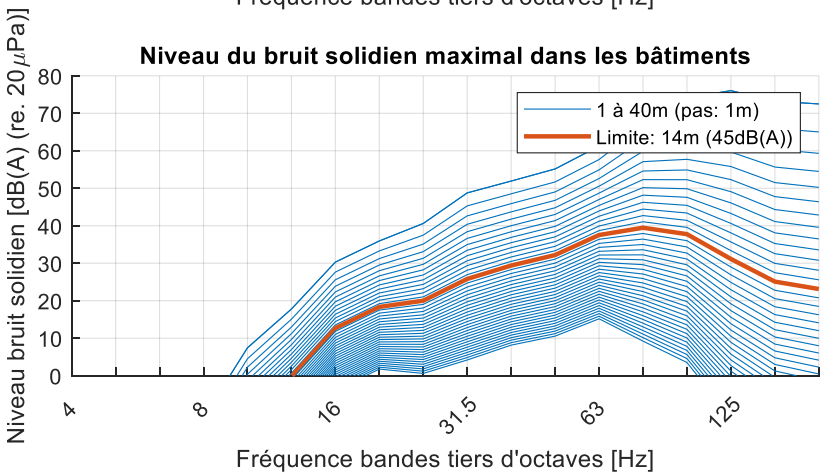


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | Pose classique + App. de voie | 50 km/u | SSC typique + OA (Viaduct)

S1

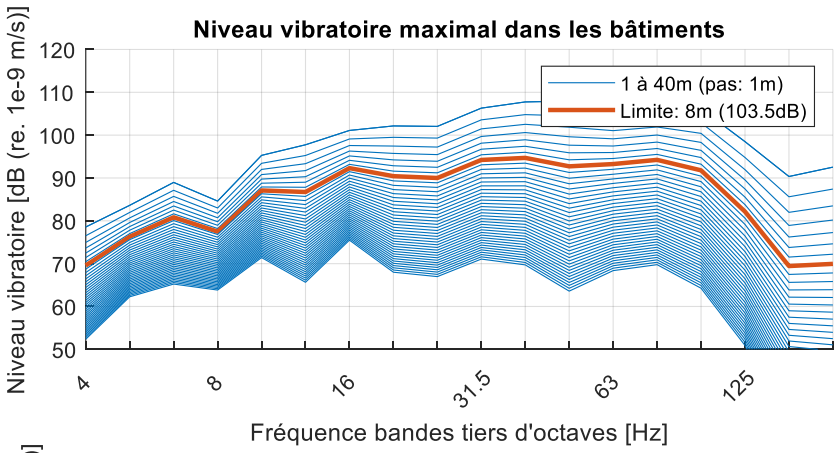


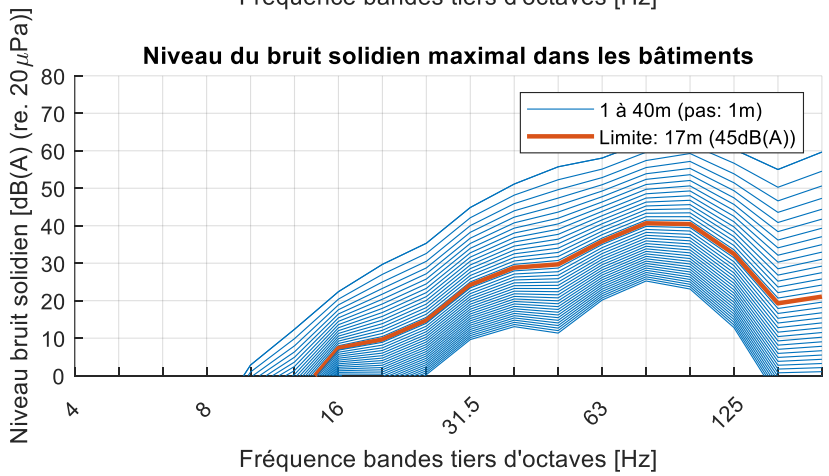


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | Pose classique + App. de voie | 50 km/u | SSC typique + OA (Viaduct)

S2

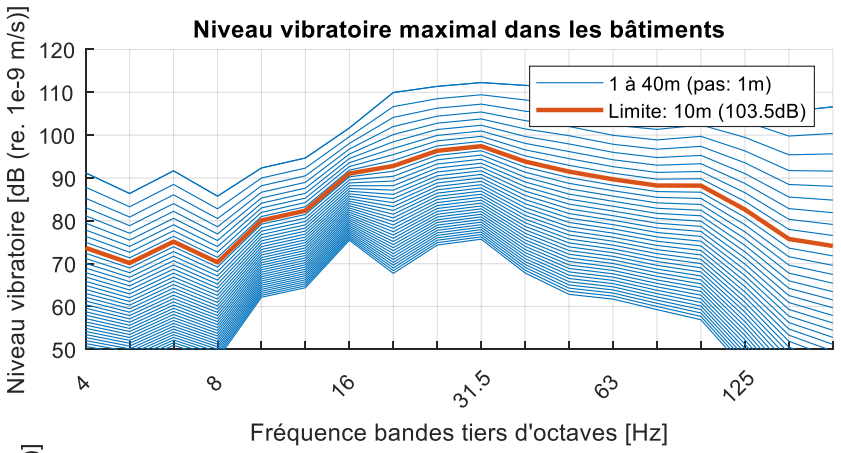


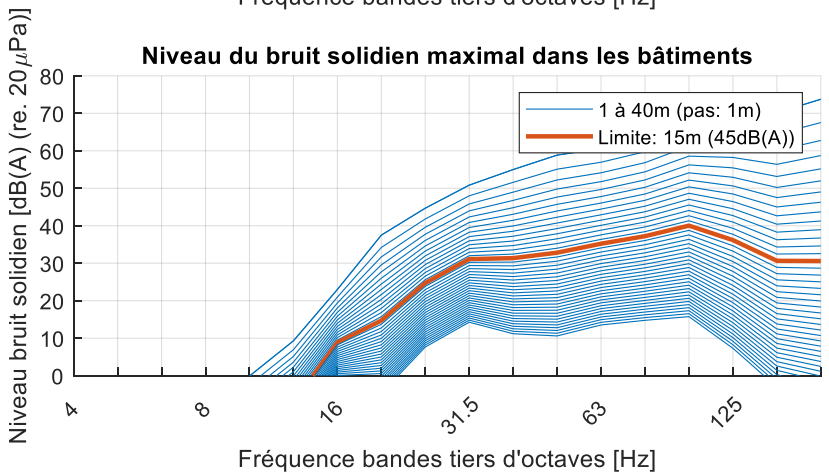


N5874 Tram rapide Esch

CAF Urbos 100 | Pose classique + App. de voie | 50 km/u | SSC typique + OA (Viaduct)

S3





ANNEXE F – TAUX D'AFFAIBLISSEMENT VIBRATOIRE

R1=7.5m	Ondes Surfaciques		
n=0.5	Source Ponctuelle/Harmonique/ Surfacique		
alpha: 0.025			
distance	réduction géométrique	absorption	total
2	1,936	1,147	2,222
3	1,581	1,119	1,769
4	1,369	1,091	1,495
5	1,225	1,064	1,304
6	1,118	1,038	1,161
7	1,035	1,013	1,048
7,5	1,000	1,000	1,000
8	0,968	0,988	0,956
9	0,913	0,963	0,879
10	0,866	0,939	0,814
11	0,826	0,916	0,757
12	0,791	0,894	0,706
13	0,760	0,872	0,662
14	0,732	0,850	0,622
15	0,707	0,829	0,586
16	0,685	0,809	0,554
17	0,664	0,789	0,524
18	0,645	0,769	0,496
19	0,628	0,750	0,471
20	0,612	0,732	0,448
21	0,598	0,714	0,426
22	0,584	0,696	0,406
23	0,571	0,679	0,388
24	0,559	0,662	0,370
25	0,548	0,646	0,354
26	0,537	0,630	0,338
27	0,527	0,614	0,324
28	0,518	0,599	0,310
29	0,509	0,584	0,297
30	0,500	0,570	0,285

R1=7.5m	Mode intermédiaire		
n=1.0	Source Ponctuelle/ Impulse/ Surfacique		
alpha: 0.025	Source Ponctuelle/Harmonique/Volumique		
distance	réduction géométrique	absorption	total
2	3,750	1,147	4,303
3	2,500	1,119	2,798
4	1,875	1,091	2,046
5	1,500	1,064	1,597
6	1,250	1,038	1,298
7	1,071	1,013	1,085
7,5	1,000	1,000	1,000
8	0,938	0,988	0,926
9	0,833	0,963	0,803
10	0,750	0,939	0,705
11	0,682	0,916	0,625
12	0,625	0,894	0,558
13	0,577	0,872	0,503
14	0,536	0,850	0,455
15	0,500	0,829	0,415
16	0,469	0,809	0,379
17	0,441	0,789	0,348
18	0,417	0,769	0,320
19	0,395	0,750	0,296
20	0,375	0,732	0,274
21	0,357	0,714	0,255
22	0,341	0,696	0,237
23	0,326	0,679	0,221
24	0,313	0,662	0,207
25	0,300	0,646	0,194
26	0,288	0,630	0,182
27	0,278	0,614	0,171
28	0,268	0,599	0,160
29	0,259	0,584	0,151
30	0,250	0,570	0,142

R1=7.5m	Ondes Volumiques		
n=1.5	Source Ponctuelle/Impulse/Volumique		
alpha: 0.025			
distance	réduction géométrique	absorption	total
2	7,262	1,147	8,332
3	3,953	1,119	4,424
4	2,567	1,091	2,802
5	1,837	1,064	1,956
6	1,398	1,038	1,451
7	1,109	1,013	1,123
7,5	1,000	1,000	1,000
8	0,908	0,988	0,896
9	0,761	0,963	0,733
10	0,650	0,939	0,610
11	0,563	0,916	0,516
12	0,494	0,894	0,442
13	0,438	0,872	0,382
14	0,392	0,850	0,333
15	0,354	0,829	0,293
16	0,321	0,809	0,259
17	0,293	0,789	0,231
18	0,269	0,769	0,207
19	0,248	0,750	0,186
20	0,230	0,732	0,168
21	0,213	0,714	0,152
22	0,199	0,696	0,139
23	0,186	0,679	0,126
24	0,175	0,662	0,116
25	0,164	0,646	0,106
26	0,155	0,630	0,098
27	0,146	0,614	0,090
28	0,139	0,599	0,083
29	0,132	0,584	0,077
30	0,125	0,570	0,071