


LUXTRAM TRONÇON K2

Étude des incidences vibratoires

Client	Luxplan s.a. 85-87 Parc d'activités L-8303 Capellen
Coordination	Simon-Christiansen & Associés
Votre réf.	E3_B_K2_tramway_étude
Commande	Offre signée du 22-11-2021
Référence Date	K4751/R07A 26-10-2022
Rédigé par	Wouter Beeterens, Karel Brouwers
Vérifié par	Bert Stallaert
Approuvé par	Tom Vanhonacker
Agrément	OA/2021/010
	Signature  dr. ir. Bert Stallaert

CONTRÔLE DE RÉVISION

Issu	Date	Description
Original	19-10-2022	1 ^{re} diffusion
A	26-10-2022	Modification après remarques xxx

La version présente remplace et annule la précédente.

DISTRIBUTION

n°	Entreprise	Nom
1	Simon Christiansen	Carine Kolber
2	Simon Christiansen	Jean-Marc Bourton
3	Luxplan	Josephine Klein

TABLE DES MATIÈRES

0	Introduction.....	1
1	Cadre légal et réglementation.....	2
1.1	Vibrations – DIN 4150-2.....	2
1.1.1	Paramètres d'évaluation	2
1.1.2	Procédure d'évaluation.....	3
1.2	Vibrations – DIN 4150-3.....	5
1.3	Bruit solide – VDI 2719	6
2	État des lieux vibratoire initial	8
3	Méthodologie du calcul.....	12
3.1	La source vibratoire ; le spectre de densité de force.....	13
3.2	La transmission vibratoire	15
3.3	Le récepteur.....	18
3.4	Prédictions et préconisations de mesures à prendre	20
4	Résultats des calculs.....	23
4.1	Plan PAG.....	24
4.2	Résultats.....	28
4.3	Mesures de mitigation.....	35
4.4	Effet cumulé	48
5	Phase chantier	50
5.1	Méthodologie	50
5.2	Critères.....	51
5.3	Sources	52
5.4	Phasage.....	53
5.5	Récepteurs	54
5.6	Scénarios à étudier.....	54
5.6.1	Scénario 1 – terrassement superficiel.....	54

5.6.2	Scénario 2 – terrassement dans la roche	55
5.6.3	Scénario 3 – terrassement superficiel ponctuel	55
5.6.4	Scénario 4 – terrassement dans la roche ponctuel.....	56
5.6.5	Scénario 5 – travaux de bétonnage et d'aménagement général.....	56
5.6.6	Scénario 6 – forage des micropieux	57
5.7	Bilan des différents impacts	57
5.7.1	Actions d'isolation dans le projet de base	57
5.7.2	Impact vibratoire	57
6	Conclusion.....	64
Annexe A – État initial, dispositif de mesure		
Annexe B – État initial, détails des mesures		
Annexe C – Mesures de transmission, dispositif de mesure		
Annexe D – 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 tramway, tronçon « K2 », première section (K2A).

Le tronçon K2 sera raccordé à la ligne existante du tramway. C'est une extension à concevoir au niveau du tronçon A de la ligne existante entre l'arrêt Pfaffenthal et l'arrêt Luxexpo ou bien le CRM existant.

La section 1 du tronçon K2 commence à la bifurcation de l'avenue John F. Kennedy pour emprunter le boulevard Konrad Adenauer jusqu'à 200m après la station Laangfur.

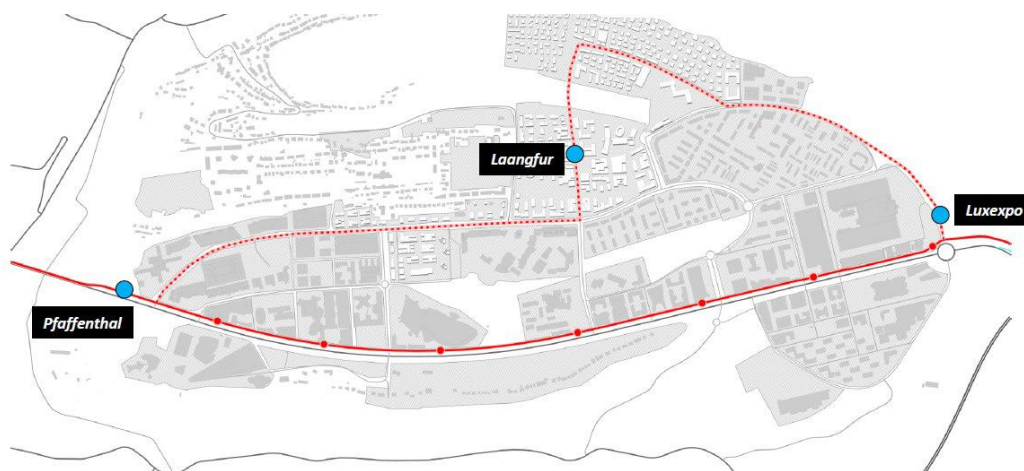


Figure 0.1 Localisation du tronçon K2 (entre Pfaffenthal et Laangfur)

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.

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 le cadre normatif ; le chapitre 2 présente les résultats des mesures de l'état initial ; le chapitre 3 décrit la méthodologie du calcul. Le chapitre 4 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 5 présente l'évaluation des incidences lors de la phase chantier. Finalement, le chapitre 6 donne la conclusion.

1 CADRE LÉGAL ET RÉGLEMENTATION

Au Luxembourg, il n'existe actuellement aucun texte réglementaire concernant les vibrations ou le bruit solidien. À défaut d'une réglementation nationale, les études d'incidences réalisées au Luxembourg s'orientent sur la réglementation 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 de cette réglementation spécifique aux vibrations et au bruit solidien, le règlement 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).

1.1 VIBRATIONS – DIN 4150-2

1.1.1 Paramètres d'évaluation

Le paramètre mesuré est KB_F , la vitesse vibratoire, pondérée selon la norme DIN 45669-1 (constante de temps $\tau=0.125$ 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 1.1.

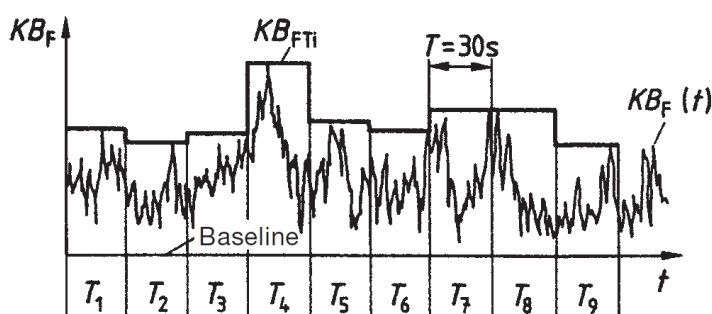


Figure 1.1 Détermination de KB_{FTi}

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

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

Le paramètre KB_{FTr} est déterminé comme suit :

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

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.

1.1.2 Procédure d'évaluation

Les paramètres d'évaluation sont déterminés et comparés aux valeurs guides dans le tableau 1.1. Le jour correspond à la période allant de 6h00 à 22h00, la nuit de 22h00 à 6h00. Le tableau 1.2 montre les mêmes valeurs, mais exprimées en [dB] (re.1^e-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	0.4	0.1
3	zone mixte commerciale et résidentielle	0.2	5	0.1	0.15	0.3	0.07
4	zone résidentielle	0.15	3	0.07	0.1	0.2	0.05
5	zone protégée (hôpitaux,...)	0.1	3	0.05	0.1	0.15	0.05

Tableau 1.1 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	112	100
3	zone mixte commerciale et résidentielle	106	134	100	103.5	109.5	97
4	zone résidentielle	103.5	129	97	100	106	94
5	zone protégée (hôpitaux,...)	100	129	94	100	103.5	94

Tableau 1.2 Valeurs guide pour l'évaluation de l'exposition aux vibrations des personnes dans les bâtiments – valeurs en [dB] (re.1^e-9m/s)

Après la détermination de KB_{Fmax} et KB_{FTr} , la chaîne de prise de décision est telle qu'illustrée à la figure 1.2. L'évaluation est basée sur la direction dans laquelle le niveau vibratoire maximal est observé.

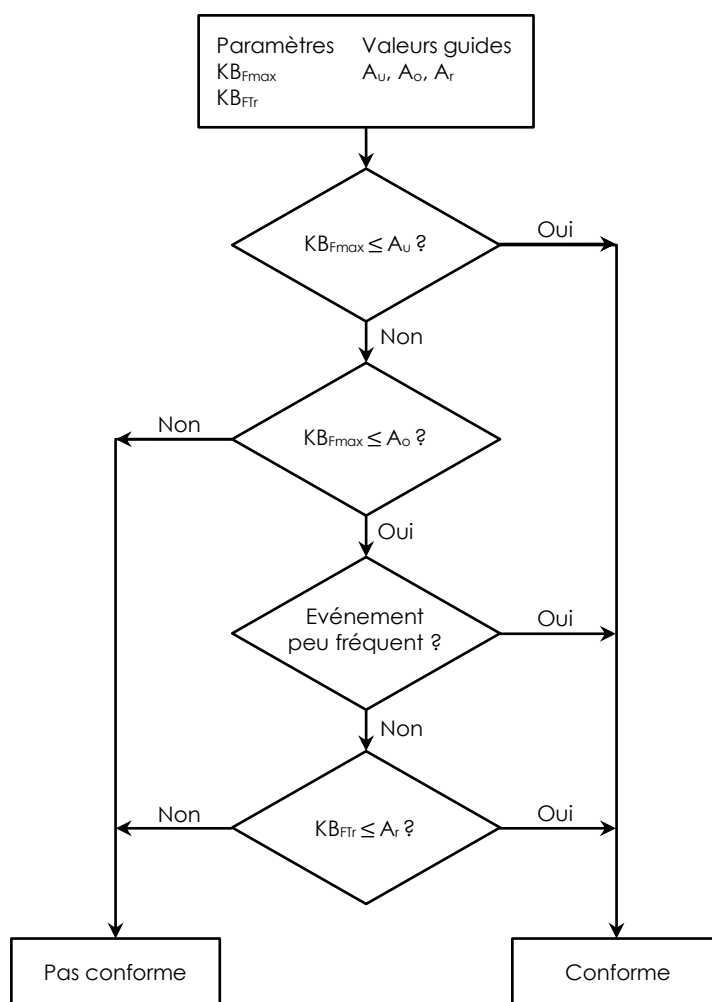


Figure 1.2 Procédure d'évaluation

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 y a lieu de noter que la norme DIN 4150-2 mentionne des dispositions spécifiques pour le trafic ferroviaire, dans le chapitre 6.5.3. La valeur A_o peut être dépassée si ce dépassement est peu fréquent et si la valeur KB_{Fmax} reste en dessous de 0.6. Toutefois, dans le cadre d'une étude prédictive, cette clause a peu d'impact ; si le niveau vibratoire dépasse régulièrement le niveau A_o , par exemple lors de chaque passage d'un certain type de tram, le niveau KB_{FTr} dépasse également le niveau A_r .

Ceci signifie que

- si $KB_{Fmax} < A_u$, les exigences de la norme sont respectées,
- si $KB_{Fmax} > A_u$ et $KB_{FTr} < A_r$, les exigences de la norme sont également respectées,
- si $KB_{FTr} > A_r$, les exigences de la norme ne sont pas respectées et des mesures de mitigation s'imposent.

Additionnellement, 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 des passages des trams. La valeur KB_{FTr} sera donnée à titre informatif.

1.2 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 1.3. 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 1.3 Valeurs limites pour l'évaluation des effets des vibrations sur les bâtiments

La figure 1.3 montre les limites d'une manière graphique.

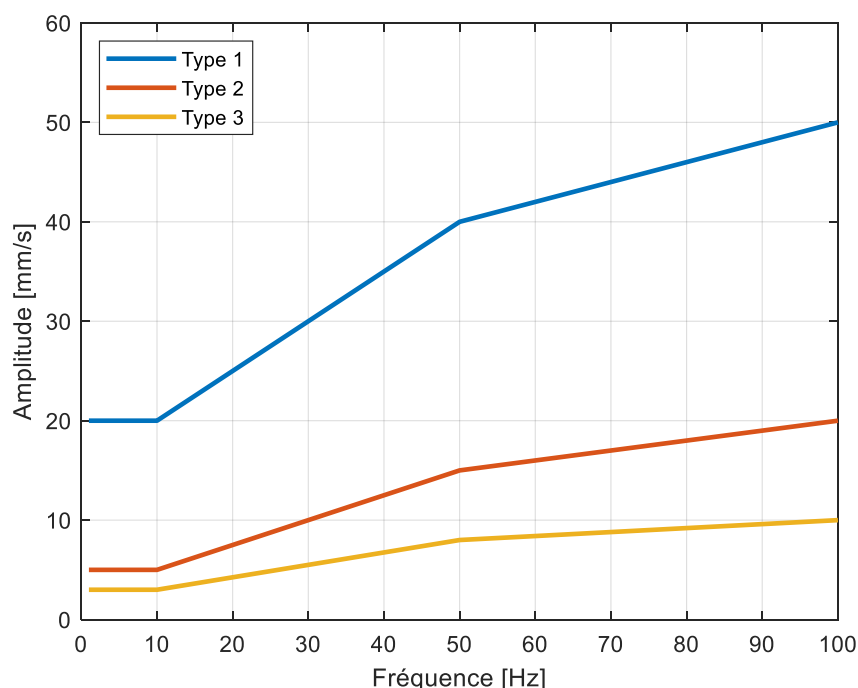


Figure 1.3 Représentation graphique des valeurs limites selon la norme DIN 4150-3

Comme le passage d'un tram ne provoque pas des 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 celle de la norme DIN 4150-3.

1.3 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 1.4 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 (sur la base du tableau 3.1, chapitre 3.4.)
 - Par jour : 260
 - Par nuit : 40 (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 solide sera moins important quand la vitesse est réduite.
 - Longueur maximale d'un véhicule (plusieurs rames) ; 56 m
 - Temps de passages pour une vitesse de 30 km/h : 6.7 secondes
- On assume que, pendant le passage, le niveau du bruit maximal est présent. La correction à appliquer sur le niveau maximal est le suivant : $10 \times \log_{10}(T_p \times N / T)$, 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 : $10 \times \log_{10}(6.7 \times 260 / (16 \times 60 \times 60)) = -15$ dB
 - Pour la nuit : $10 \times \log_{10}(6.7 \times 40 / (8 \times 60 \times 60)) = -20$ dB

Pendant le jour, la différence entre le niveau maximal et le niveau moyen est donc 15 dB. Pendant la nuit, la différence est 20 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.

2 ÉTAT DES LIEUX VIBRATOIRE INITIAL

Ce chapitre présente les résultats des mesures de l'état initial. Dans toutes les sections de mesure, le niveau vibratoire actuel est enregistré pendant au minimum 30 minutes. La figure 2.1 montre la localisation des points de mesure. Les points de mesures ont été réparties sur la longueur du tronçon, avec 2 points (P1 et P2) à proximité d'un bâtiment existant et 2 points (P3 et P4) à la limite de la parcelle d'un bâtiment encore à construire. Les points P3 et P4 se trouvent donc plus près du boulevard Konrad Adenauer et les niveaux sont par conséquent plus élevés. L'annexe A montre le dispositif de mesure dans tous ces points et des photos.

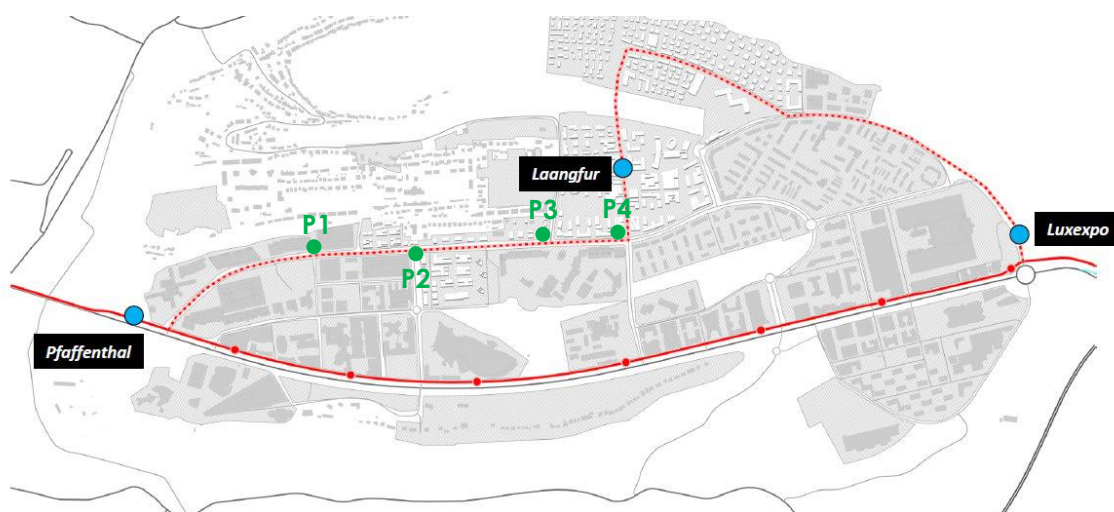


Figure 2.1 État initial : localisation des points de mesures vibratoires P1 à P4

Pour chaque section considérée, les niveaux vibratoires actuels dus aux bus, poids lourds et voitures sont mesurés. Les mesures ont été effectuées le 17-01-2022.

Pour la section P1, les niveaux vibratoires sont mesurés sur le sol devant la façade du bâtiment existant (points V1 et V2) et sur la fondation du bâtiment (point V3). Pour la section P2, les niveaux vibratoires sont mesurés sur le sol devant la façade d'un nouveau bâtiment (points V1 et V2) et sur la fondation de ce bâtiment (point V3). Finalement, pour les sections P3 et P4, les niveaux vibratoires sont mesurés sur le sol à la limite de la parcelle (points V1, V2 et V3).

Les points de mesure sont localisés aux figures dans l'annexe A.

On mesure pour chaque section considérée :

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

Les résultats sont donnés en détail dans l'annexe B.

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 2.2 donne un exemple de résultat pour la section P1.

PROJECT: K4751 - Kirchberg K2 SECTION: P1

REC: REC001_01.mat

REMARQUE: Plusieurs bus, voitures, poids lourds

TIME: 17/01/2022 11:03:07

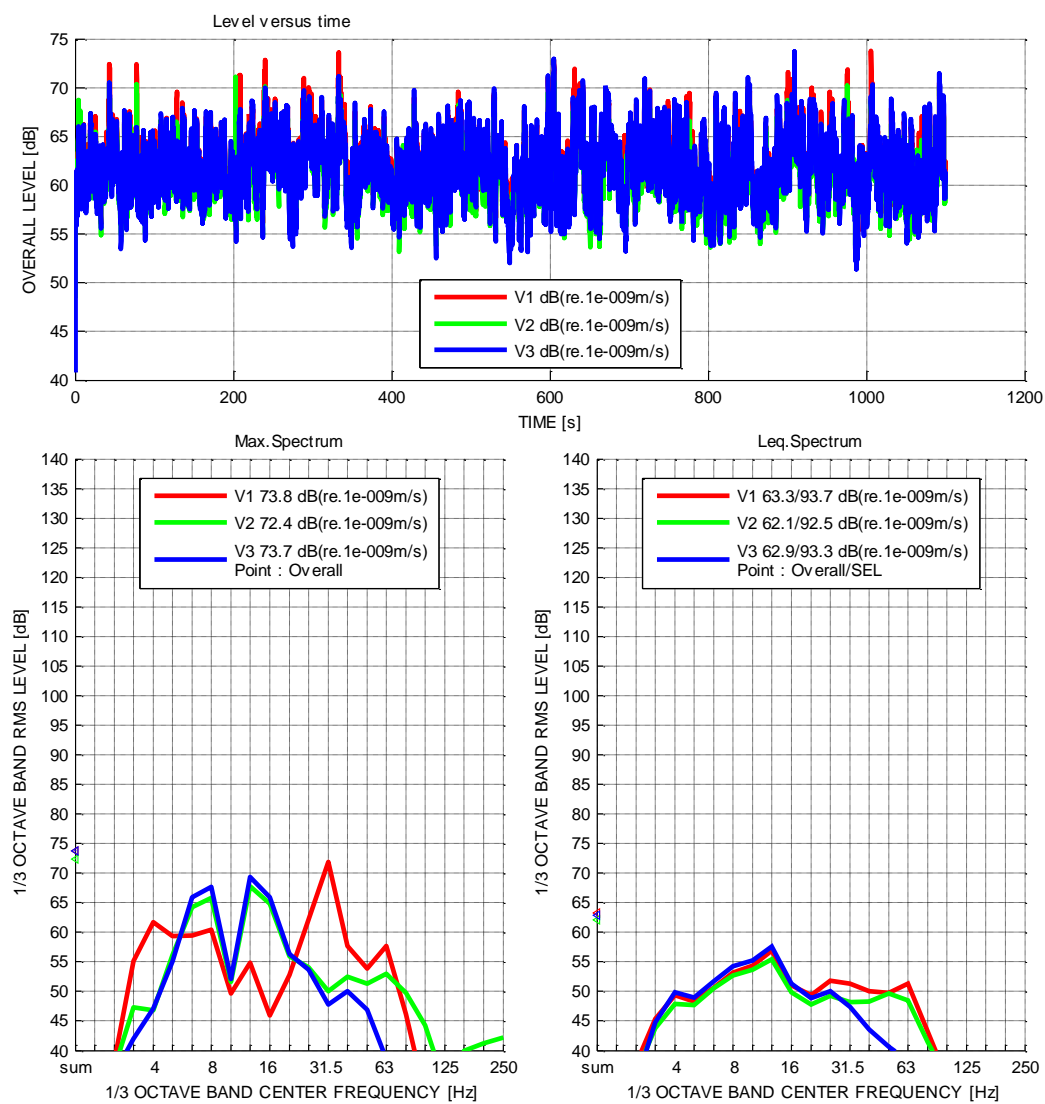


Figure 2.2 Exemple de résultat pour la section P1

Les résultats détaillés sont résumés au tableau 2.1 pour les sections P1 à P4. Le type des véhicules est indiqué, ainsi que le numéro de la page sur laquelle se trouve la figure correspondante dans l'annexe B qui donne les spectres mesurés. Le tableau 2.2 donne les résultats en valeurs KB.

Pour toutes les sections, les niveaux les plus élevés (bus et poids lourds) ont été causés par le trafic du Boulevard Konrad Adenauer. Pour les sections P1 et P2, on constate un découplage sol-structure. Quand les vibrations « entrent » 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. Au niveau des sections P3 et P4, il n'était pas possible de mesurer sur la fondation du bâtiment. Les niveaux vibratoires sont mesurés sur le sol à la limite de la parcelle, ce qui est plus proche du Boulevard Konrad Adenauer où les bus et les poids lourds provoquent des niveaux plus élevés qu'au niveau des sections P1 et P2.

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 un niveau maximal de 84.8 dB ($KB_{Fmax} = 0.02$) sur la fondation (section P2, point V3), il est fort probable que le seuil de perception de 100 dB ($KB=0.1$) ne soit pas dépassé à l'intérieur du bâtiment, même après une amplification structurelle causée par les planchers des différentes pièces. Dans les points P3 et P4, des niveaux vibratoires maximaux de plus de 100 dB sont enregistrés, mais comme il s'agit des mesures sur le sol, l'effet du découplage sol-structure n'est pas pris en considération. Il importe de noter que la fréquence dominante est relativement haute, autour de 50 Hz.

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	type de véhicule	niveau vibratoire en dB						page annexe B
				V1	L _{max} V2	V3	V1	L _{eq} V2	V3	
					(re. 1 e-9m/s)					
P1	REC001_01.mat	11:03:07	Plusieurs bus, voitures, poids lourds	73.8	72.4	73.7	63.3	62.1	62.9	B - 1
P1	REC001_02.mat	11:21:27	Plusieurs bus, voitures, poids lourds	76.5	73.8	71.9	61.1	59.9	61.0	B - 2
P2	REC002_01.mat	11:52:15	Plusieurs bus, voitures, poids lourds	85.8	88.8	78.0	65.7	70.6	64.8	B - 3
P2	REC002_02.mat	12:08:55	Plusieurs bus, voitures, poids lourds	86.7	90.4	84.8	66.1	70.9	64.6	B - 4
P3	REC004_01.mat	14:31:51	Plusieurs bus, voitures, poids lourds	100.0	102.6	104.0	73.5	75.4	79.4	B - 5
P3	REC004_02.mat	14:46:35	Plusieurs bus, voitures, poids lourds	99.7	102.5	104.1	72.2	75.4	79.4	B - 6
P4	REC003_01.mat	13:52:31	Plusieurs bus, voitures, poids lourds	98.5	97.9	94.4	77.2	75.4	73.2	B - 7
P4	REC003_02.mat	14:09:11	Plusieurs bus, voitures, poids lourds	102.1	97.8	96.0	76.2	74.9	72.4	B - 8

Tableau 2.1 Résultats des mesures de l'état actuel vibratoire – valeurs exprimées en dB

section	record_ID	heure	type de véhicule	niveau vibratoire en KB			page annexe B
				V1	KB_{Fmax} V2	V3	
P1	REC001_01.mat	11:03:07	Plusieurs bus, voitures, poids lourds	0.00	0.00	0.00	B - 1
P1	REC001_02.mat	11:21:27	Plusieurs bus, voitures, poids lourds	0.01	0.00	0.00	B - 2
P2	REC002_01.mat	11:52:15	Plusieurs bus, voitures, poids lourds	0.02	0.03	0.01	B - 3
P2	REC002_02.mat	12:08:55	Plusieurs bus, voitures, poids lourds	0.02	0.03	0.02	B - 4
P3	REC004_01.mat	14:31:51	Plusieurs bus, voitures, poids lourds	0.10	0.13	0.16	B - 5
P3	REC004_02.mat	14:46:35	Plusieurs bus, voitures, poids lourds	0.10	0.13	0.16	B - 6
P4	REC003_01.mat	13:52:31	Plusieurs bus, voitures, poids lourds	0.08	0.08	0.05	B - 7
P4	REC003_02.mat	14:09:11	Plusieurs bus, voitures, poids lourds	0.13	0.08	0.06	B - 8

Tableau 2.2 Résultats des mesures de l'état actuel vibratoire – valeurs KB

3 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 correspondantes aux fréquences de résonance des éléments structuraux. 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 3.1 montre schématiquement la transmission des vibrations de la voie aux bâtiments.

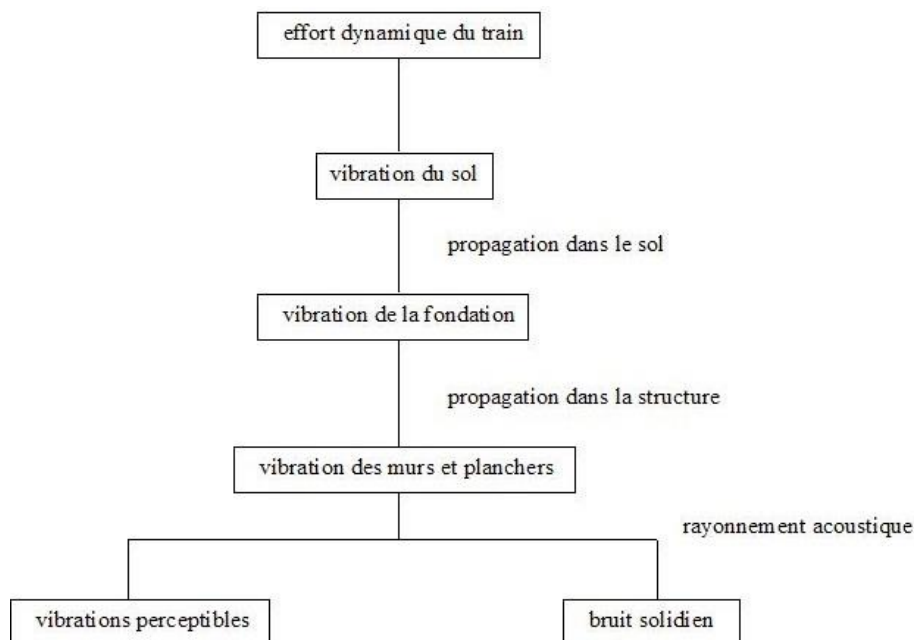


Figure 3.1 Transmission des vibrations

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.

3.1 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 3.2 montre quelques photos de cette mesure.

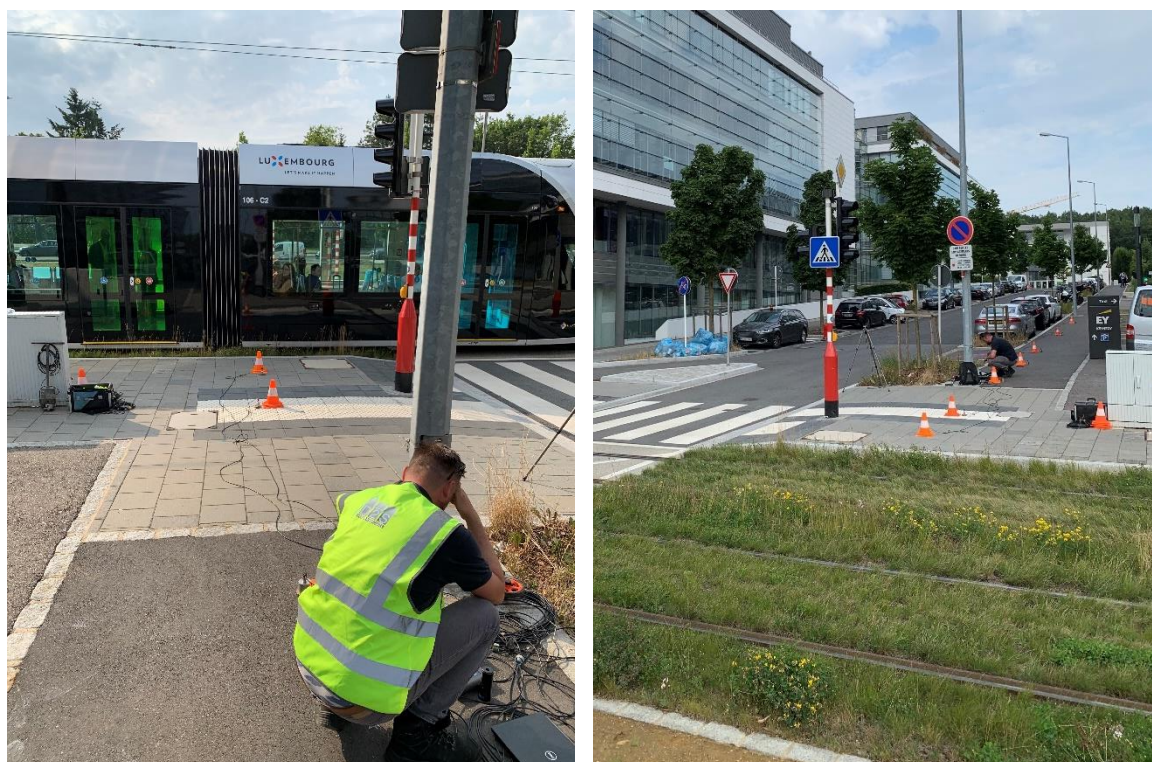


Figure 3.2 Mesure du spectre de densité d'effort du tram à Luxembourg

La figure 3.3 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.

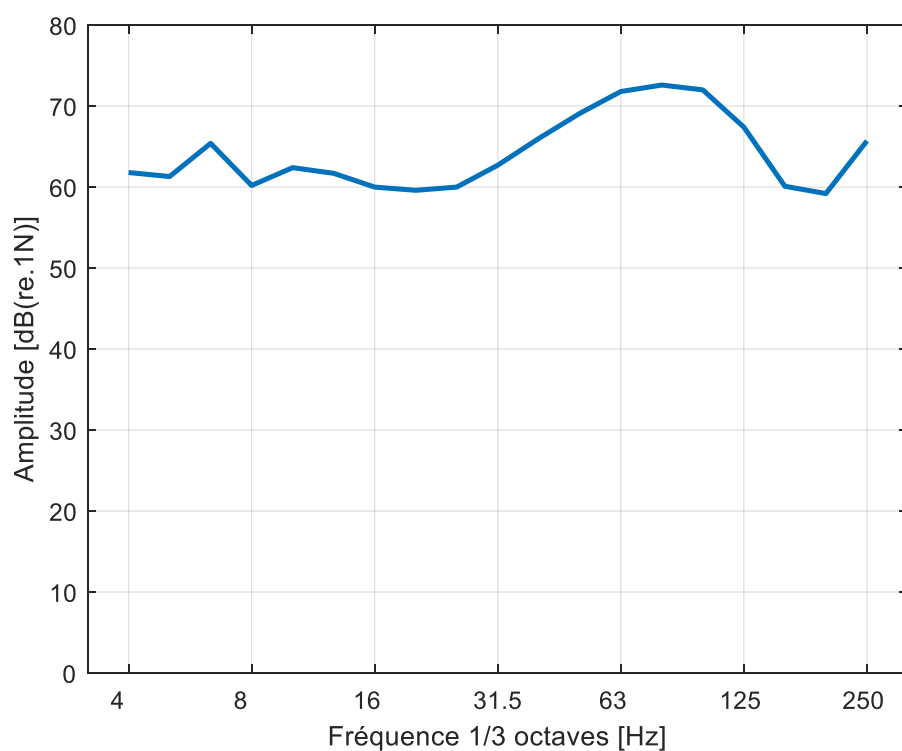


Figure 3.3 Spectre de densité d'effort à 50 km/h

3.2 LA TRANSMISSION VIBRATOIRE

Des mesures de transmissibilité ont été effectuées en quatre sections le long du futur tracé, dont les localisations sont données dans la figure 3.4. 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 préliminaires reçues, la variation du type de sol est faible sur le périmètre du projet.

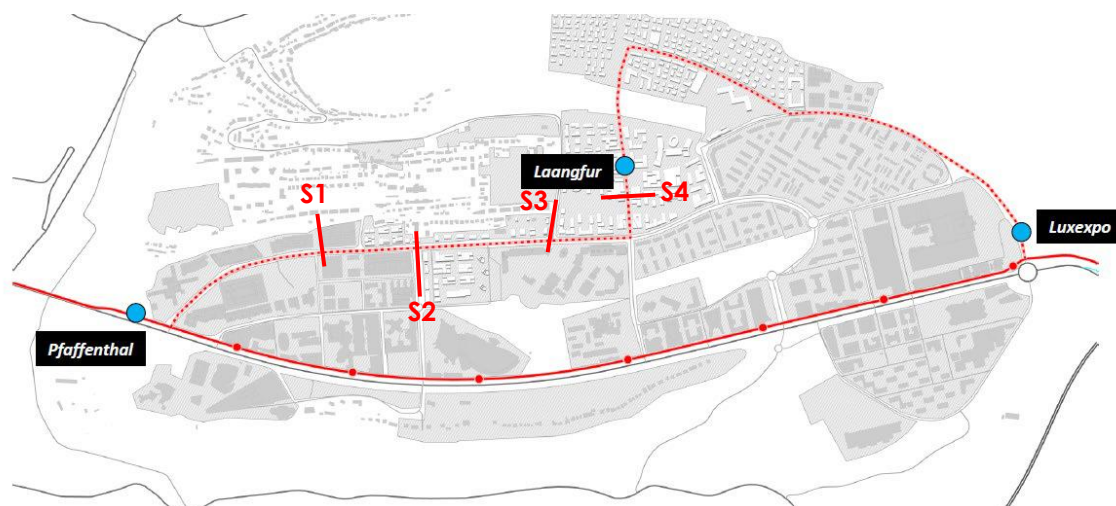


Figure 3.4 Mesures de transmission – localisation des points de mesures le long du tracé

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, 4, 8, 12, 16, 22, 30 et 40 mètres (V1 à V8). La localisation des différents points de mesure est donnée aux figures dans l'annexe C. Les fonctions de transfert vibratoire sont calculées pour chaque point de réponse. Les courbes de transmissibilité sont visualisées aux figures 3.5 à 3.8. Les figures ne montrent pas les courbes mesurées, mais celles après interpolation de sorte que l'atténuation vibratoire est monotone avec la distance.

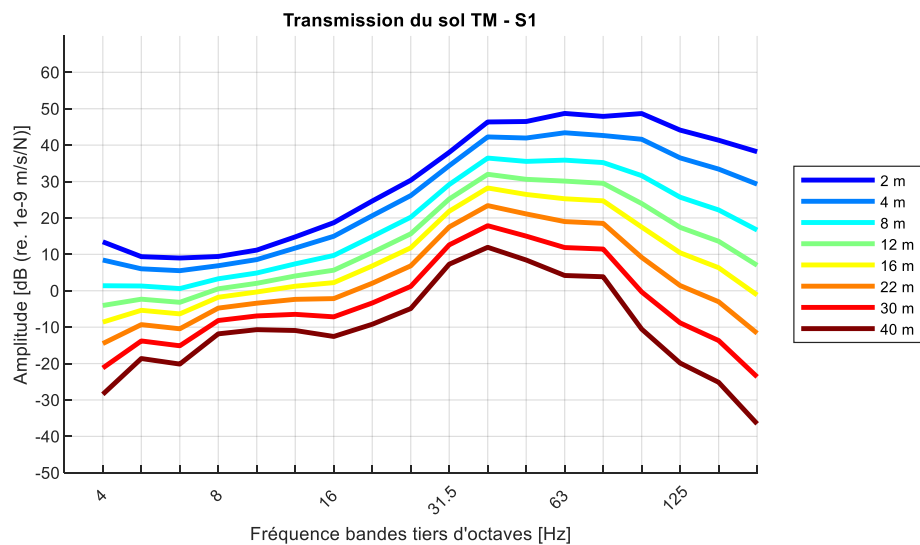


Figure 3.5 Section S1 : courbes de transmissibilité

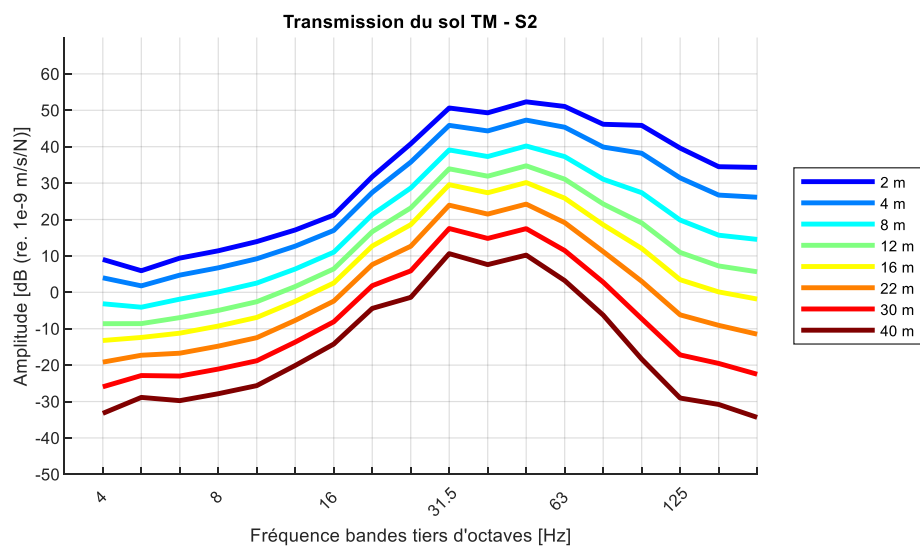


Figure 3.6 Section S2 : courbes de transmissibilité

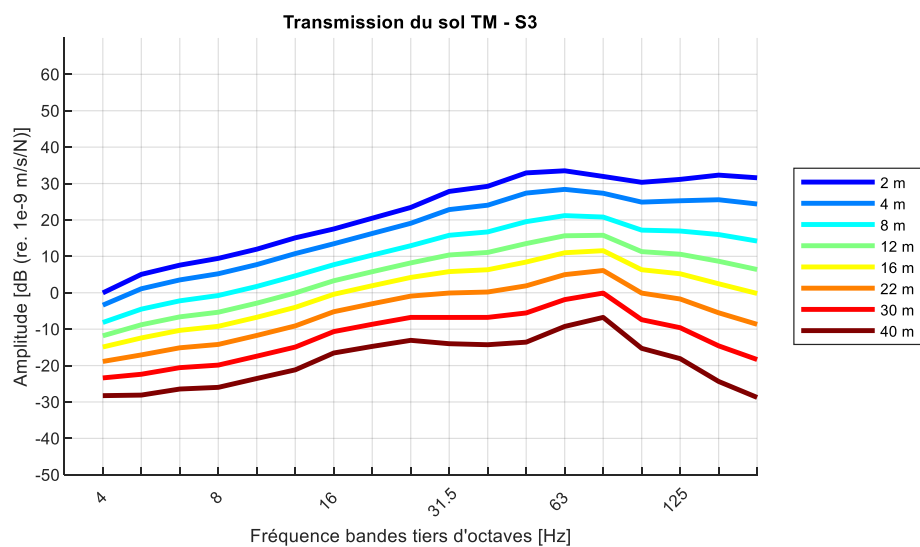


Figure 3.7 Section S3 : courbes de transmissibilité

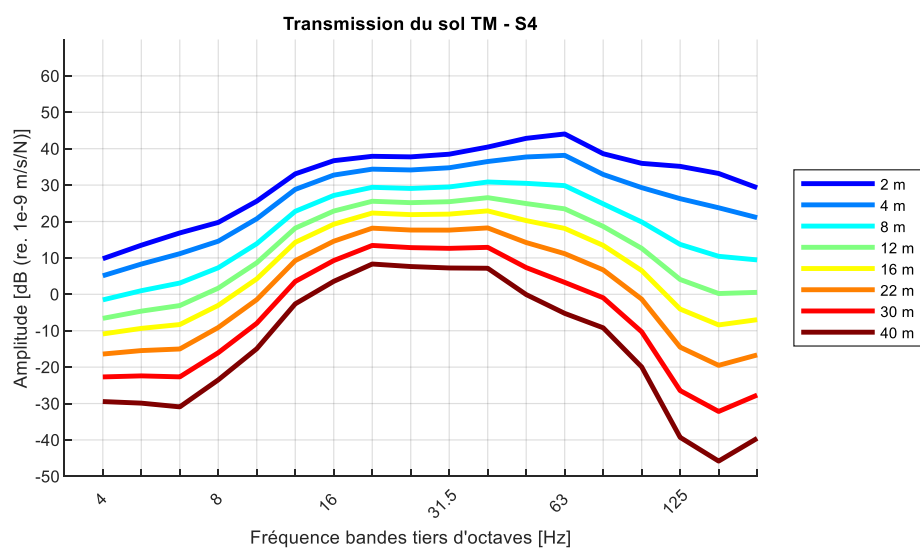


Figure 3.8 Section S4 : courbes de transmissibilité

3.3 LE RÉCEPTEUR

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

- Couplage sol-fondations ; quand les vibrations « entrent » 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 3.9 montre l'amplification et le couplage sol-structure appliqué dans les calculs.

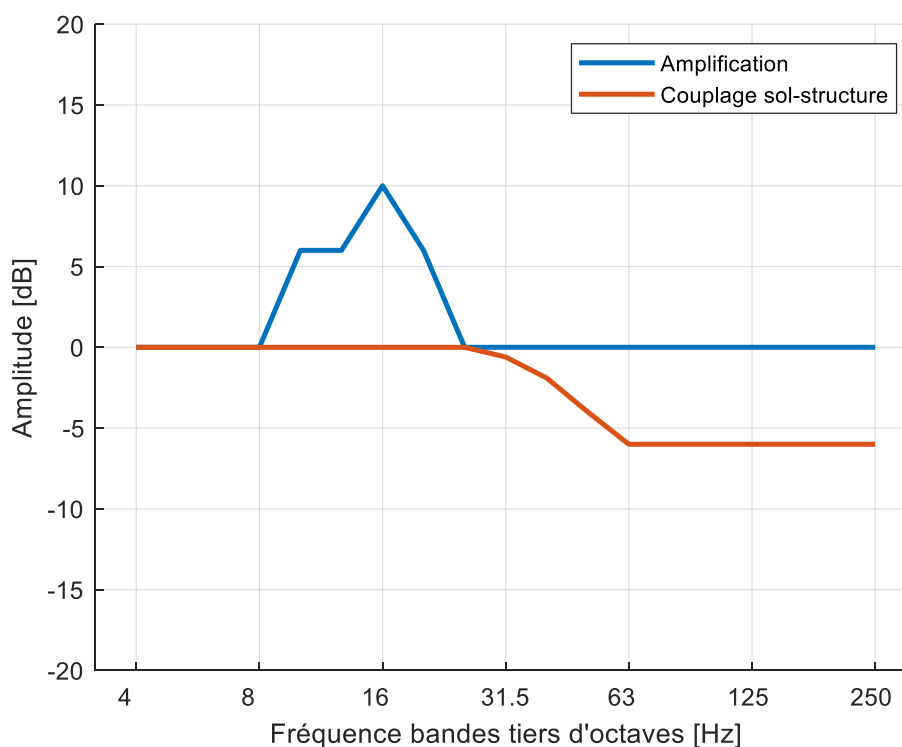


Figure 3.9 Amplification et couplage sol-structure

Finalement, les vibrations des planchers et des murs sont rayonnées comme du bruit solide ; un bruit plutôt basse fréquence, causé par les vibrations. Le niveau du bruit solide 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
- v^2 : 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 m^2 d'absorption parfaite

- Formule de Sabine

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

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

Avec les hypothèses suivantes :

- $W_0 = 1 \cdot 10^{-12} \text{ W}$
- $P_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$
- $V_0 = 1 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3/\text{s}$
- $T = 2 \text{ s}$
- H = la hauteur du volume = 3 m
- $\sigma = 1$
- 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.

3.4 PRÉDICTIONS ET PRÉCONISATIONS DE MESURES À PRENDRE

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 3.10. Dans une approche conservatrice, le gabarit de vitesse lissée est considéré.

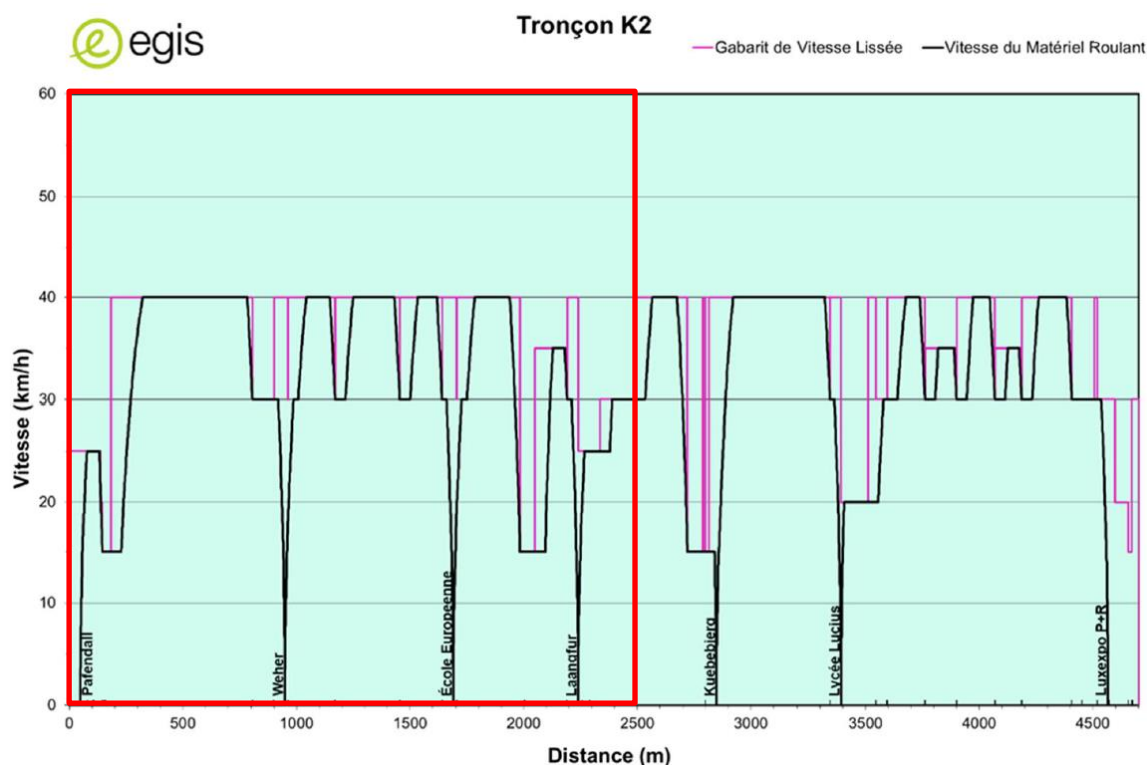


Figure 3.10 Diagramme des vitesses de Pfaffenthal à Luxexpo P+R

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 déterminée et « v » la vitesse de calcul.

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 des passages par jour et par nuit dépend de l'horaire des fréquences de passage des trams, comme illustré au tableau 3.1. Sur la base de cette horaire, le nombre de trams par jour (06h00-22h00) pendant la semaine (la période avec la fréquence la plus importante) est de 260 et le nombre de trams par nuit (22h00-06h00) est de 40.

Jour	Période		Fréquence [minutes]
	Début	Fin	
Du lundi au vendredi (ou samedi et jours fériés lors d'évènements particuliers)	04h30	06h30	10
	06h30	09h30	6
	09h30	16h00	8
	16h00	19h30	6
	19h30	21h00	10
	21h00	00h30	15
Samedi	04h30	08h00	15
	08h00	19h00	8
	19h00	01h30	15
Dimanche et jours fériés	06h00	00h00	15

Tableau 3.1 Tableau horaire des fréquences de passage des trams sur la ligne K2

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 3.11 montre la perte par insertion exigée des systèmes antivibratoires. Il ne s'agit pas des 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.

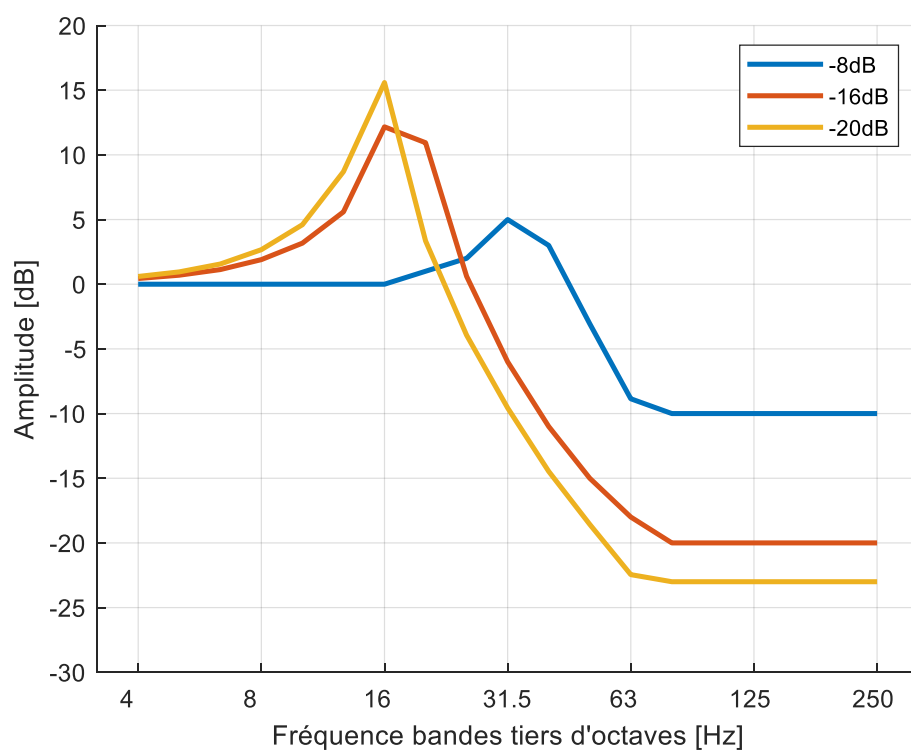


Figure 3.11 Performance exigée (perte par insertion) des systèmes antivibratoires

4 RÉSULTATS DES CALCULS

La figure 4.1 montre un exemple d'un résultat de calcul. Les calculs ont été faits pour la voie de référence, une voie « -8 dB », une voie « -16 dB » et pour une voie « -20 dB », type dalle flottante, sans et avec appareil de voie.

K4877 - Kirchberg K2

CAF Urbos 100 | 50 km/u | SSC typique

S1

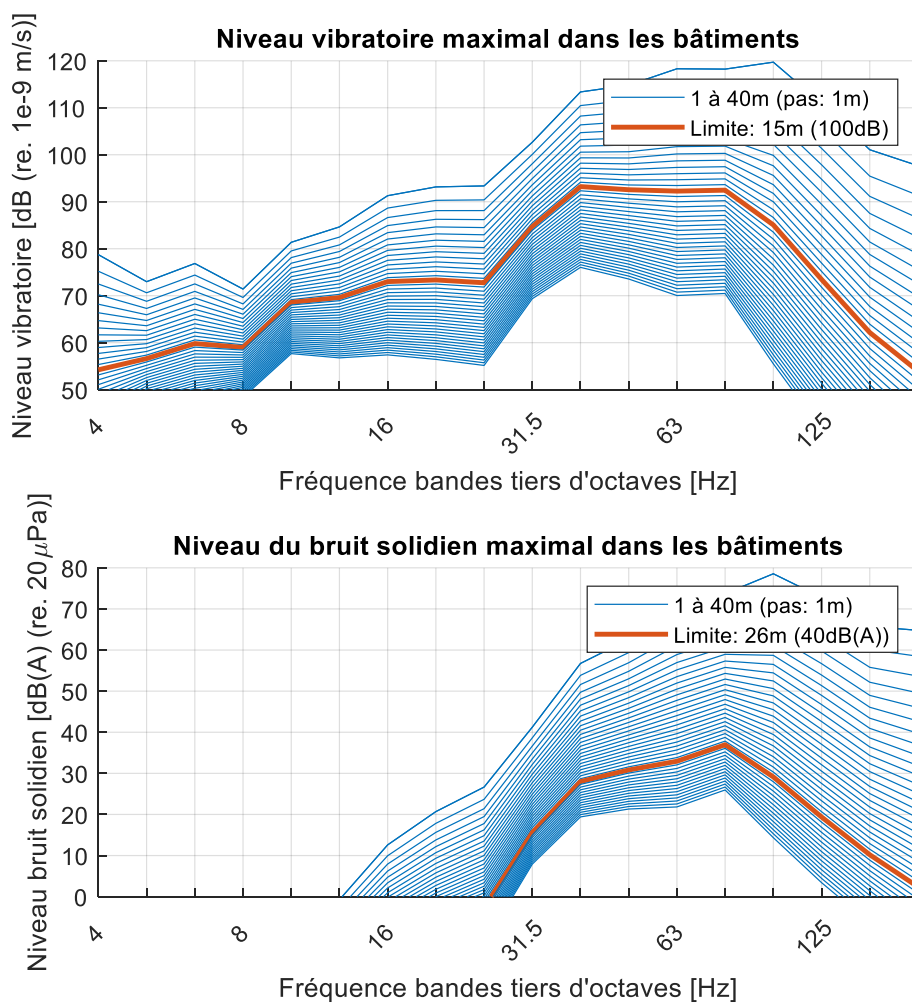


Figure 4.1 Exemple d'un résultat de calcul

- 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 correspondante 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 correspondante 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.

4.1 PLAN PAG

La figure 4.2 montre le plan d'aménagement général « PAG » de Kirchberg où le tronçon K2 sera construit. Le tronçon étudié est montré en bleu clair et les sections des mesures de transmissibilité S1 à S4 sont également montrées.

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

La zone mixte SPEC-MIX-cen en orange

La zone mixte urbaine centrale européenne et nationale est essentiellement destinée aux institutions européennes et nationales. Y sont également admis des services administratifs ou professionnels, des activités d'artisanat et de commerce, des activités de loisirs, des hôtels, des restaurants et des débits de boissons, ainsi que des constructions, des établissements, des équipements et des aménagements de service public et d'intérêt général, des habitations et des espaces libres correspondant à l'ensemble de ces fonctions.

Les crèches sont uniquement autorisées au rez-de-chaussée des constructions et doivent disposer d'un jardin privatif dans la marge de reculement postérieure directement accessible depuis la crèche.

L'implantation de nouvelles stations-service n'y est pas autorisée. Y sont interdits les constructions et les établissements qui par leur nature, leur importance, leur étendue, leur volume et leur aspect seraient incompatibles avec la sécurité, la salubrité, la commodité et la tranquillité d'un quartier mixte ou dont l'intégration dans l'îlot ou dans la rue n'est pas garantie.

Pour tout plan d'aménagement particulier « nouveau quartier », aucune surface construite brute à réserver à l'habitation n'est exigée sauf pour les PAP NQ énumérées ci-dessous.

La zone mixte MIX-u en rouge

La zone mixte urbaine couvre les quartiers ou parties de quartiers à caractère urbain. Elle est destinée à renforcer la centralité des quartiers et à accueillir, en fonction de sa localisation et de sa vocation, des habitations, des activités d'artisanat et de commerce, dont la surface de vente est limitée à 10.000 m² par immeuble bâti, des activités de loisirs, des services administratifs ou professionnels, des hôtels, des restaurants et des débits de boissons, ainsi que des constructions, des établissements, des équipements et des aménagements de service public et d'intérêt général et des espaces libres correspondant à l'ensemble de ces fonctions.

Les crèches sont uniquement autorisées au rez-de-chaussée des constructions et doivent disposer d'un jardin privatif dans la marge de reculement postérieure directement accessible depuis la crèche.

L'implantation de nouvelles stations-service n'y est pas autorisée. Y sont interdits les constructions et les établissements qui par leur nature, leur importance, leur étendue, leur volume et leur aspect seraient incompatibles avec la sécurité, la salubrité, la commodité et la tranquillité d'un quartier mixte ou dont l'intégration dans l'îlot ou dans la rue n'est pas garantie.

Pour tout plan d'aménagement particulier « nouveau quartier », la part minimale de la surface construite brute à réserver à l'habitation ne peut être inférieure à 25%, sauf pour les PAP NQ énumérées ci-dessous.

La zone résidentielle HAB-2 en beige

La zone d'habitation 2 est destinée aux maisons d'habitation unifamiliales, bi familiales et plurifamiliales, ainsi qu'aux établissements d'hébergement.

En fonction de la localisation et de la vocation du quartier, y sont également admis des activités de commerce de détail, des activités artisanales et de loisirs, des services administratifs ou professionnels, des activités culturelles, des prestations de services qui sont le complément naturel à l'habitation, ainsi que des constructions, des établissements, des équipements et des aménagements de service public et d'intérêt général et des espaces libres correspondant à l'ensemble de ces fonctions.

Les crèches sont autorisées dans les maisons unifamiliales ainsi qu'au rez-de-chaussée des maisons bi-familiales, des maisons plurifamiliales et des établissements d'hébergement. Toute crèche doit disposer d'un jardin privatif dans la marge de reculement postérieure directement accessible depuis la crèche.

L'implantation de nouvelles stations-service n'y est pas autorisée. La rénovation et la mise aux normes des constructions et équipements des stations-service existantes sont autorisées.

Y sont interdits les constructions et les établissements qui par leur nature, leur importance, leur étendue, leur volume et leur aspect seraient incompatibles avec la sécurité, la salubrité, la commodité et la tranquillité d'un quartier d'habitation ou dont l'intégration dans l'îlot ou dans la rue n'est pas garantie.

Pour tout plan d'aménagement particulier « nouveau quartier » exécutant une zone d'habitation 2, au moins la moitié des logements est de type collectif. La surface construite brute à dédier à des fins de logement est de 80% au minimum. Si les fonctionnalités, les caractéristiques ou les particularités du site l'exigent, il peut être dérogé au principe des 80% de surface construite brute à dédier à des fins de logement.

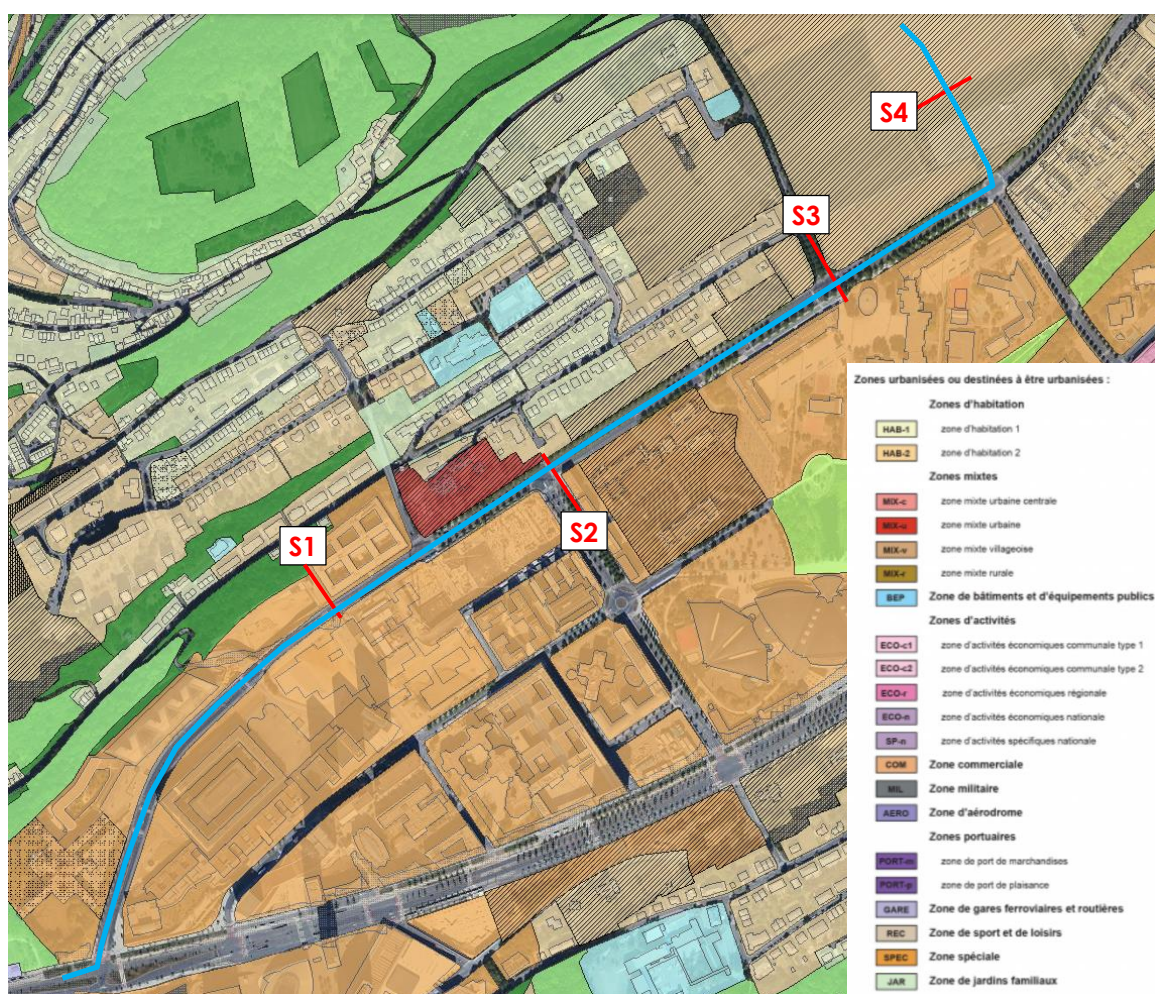


Figure 4.2 Plan d'aménagement général de la zone concernée – Luxembourg Kirchberg

Pour la zone HAB-2, les limites pour des bâtiments résidentiels sont considérées ;

- la zone 4 de la norme DIN 4150-2 ;
- 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 ;
- le bruit solidien est limité à 45 dB(A).

La détermination de la nature des bâtiments pour les bâtiments futurs est basée sur les données suivantes :

- Le Plan d'Aménagement Particulier – Nouveau Quartier « Bd. K. Adenauer – Zone 3A » (KI-14A), dit « The Fork ». Ce plan d'aménagement particulier prévoit 3 lots réservés à titre principal à l'habitat, soit 80% correspondant à des logements. Les 20% restants, situés au rez-de-chaussée des bâtiments, peuvent être dédiés à des activités de commerces, administratives, professionnelles ou encore de services. Les sous-sols seront dédiés aux garages collectifs.
- Le Plan d'Aménagement Particulier – Nouveau Quartier « Bd. K. Adenauer – Zone 3B » (KI-14B). Ici sont prévus 2 immeubles collectifs de type mixte (habitat, commerces/bureaux), avec un maximum de 58 unités d'habitation. Comme précédemment, il s'agit d'un projet essentiellement voué à l'habitat avec une possibilité d'activités commerciales, professionnelles, de service ou autres à hauteur de 20%.
- Les Plans d'Aménagement Particulier – Nouveau Quartier « Bd. K. Adenauer – K13 » (KI-1311) et « Bd. K. Adenauer – K12 » (KI-1211). De la même façon, ces deux projets de développement ont pour vocation principale la construction de logements avec la possibilité d'y intégrer des activités commerciales, professionnelles ou de services : 20% de la surface pour le projet K13 et 40% pour le projet K12 faisant de celui-ci une zone de développement davantage mixte.
- Plusieurs Plans d'Aménagement Particulier entre la rue Erasme et la rue Albert Wehrer. Actuellement, le bureau d'études dispose de peu d'informations sur ces projets situés directement en limite de la zone d'étude. Il est cependant possible de préciser que ces PAP sont essentiellement à vocation d'habitations et de développement tertiaire avec la construction de la 3^e extension de la Banque Européenne d'Investissement. Dans une approche conservatrice, les limites pour des bâtiments résidentiels sont considérés.

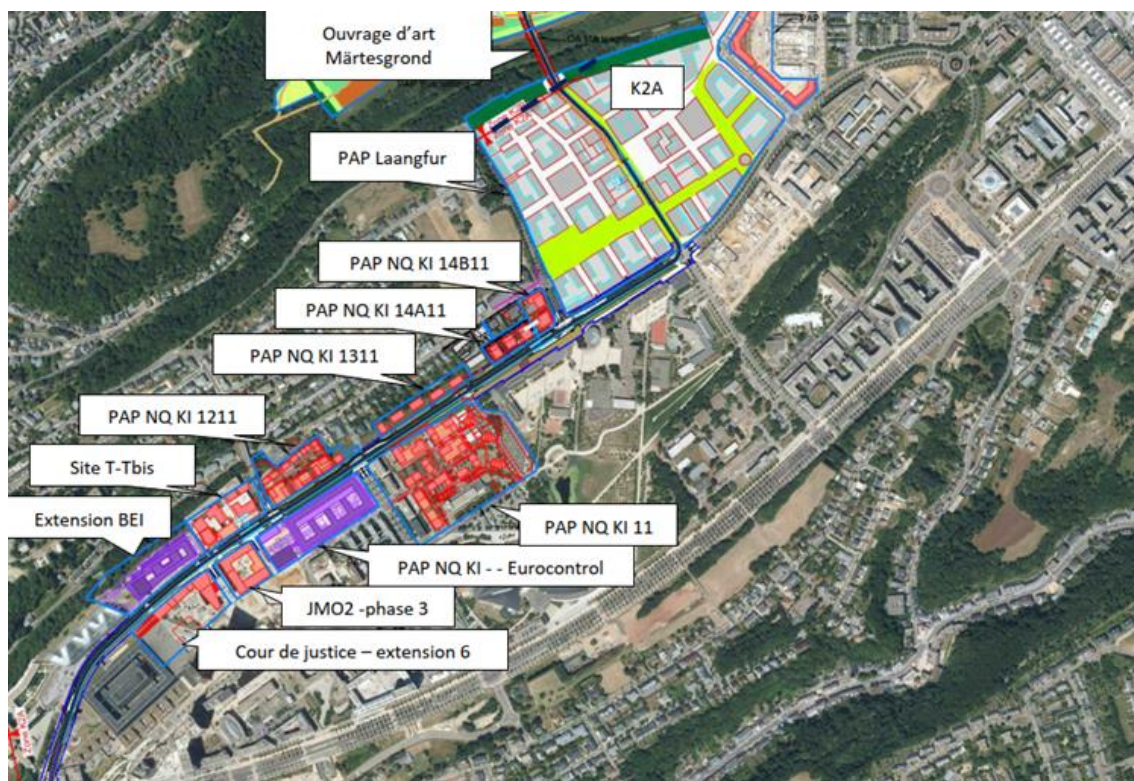


Figure 4.3 Plans d'aménagement

4.2

RÉSULTATS

Le tableau 4.1 montre les résultats de calcul pour tous les bâtiments, avec leur classification selon la norme DIN 4150-2, les limites applicables, la distance entre le bâtiment et la future voie et la vitesse des trams considérée.

Les distances réelles entre la future voie et les bâtiments (existants et futurs) sont données dans les figures 4.4 à 4.8. Des bâtiments futurs sont issus du plan PAG « APS-1624E-K2A-ARC-T5120-PSY-000312-A.pdf » pour la zone entre l'avenue John Fitzgerald Kennedy et Laangfur. Les contours des futurs bâtiments sont montrés en rouge.

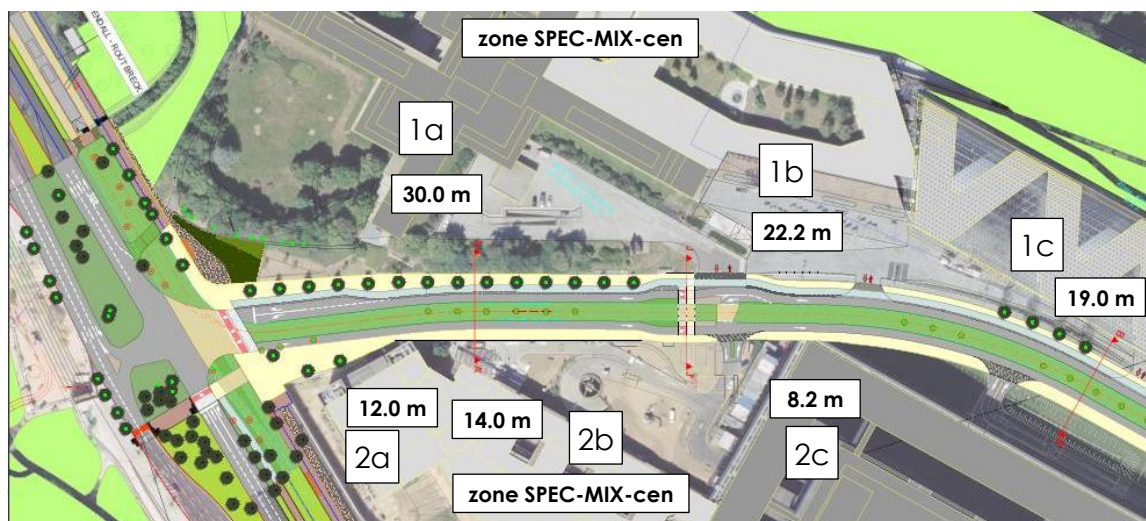


Figure 4.4 Points d'évaluation, partie 1

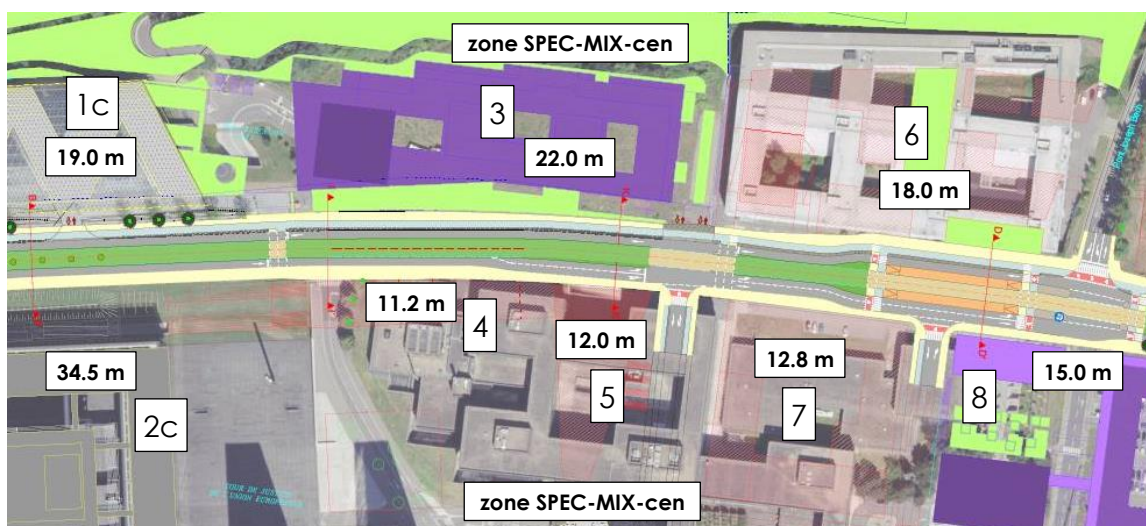


Figure 4.5 Points d'évaluation, partie 2

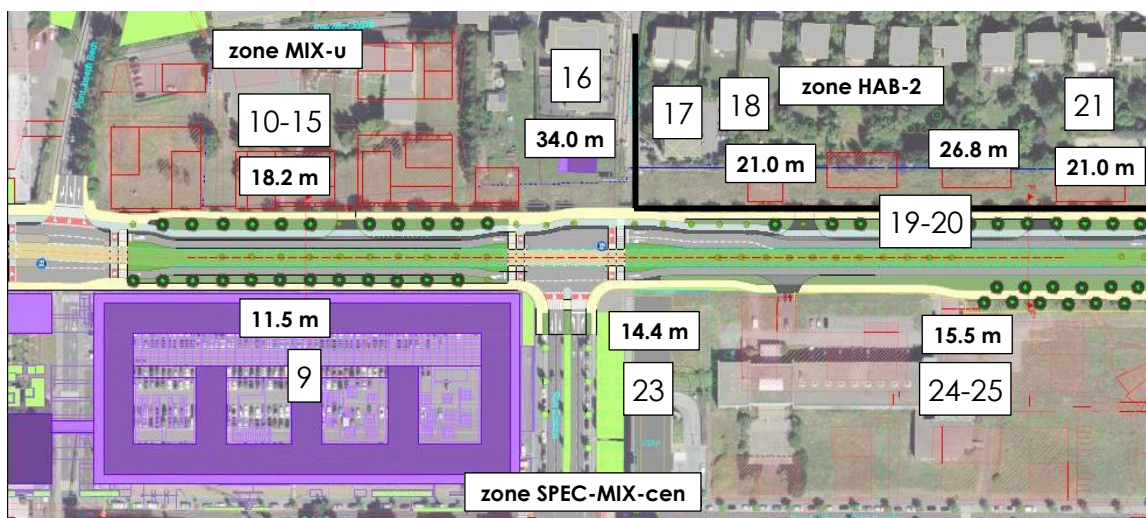


Figure 4.6 Points d'évaluation, partie 3

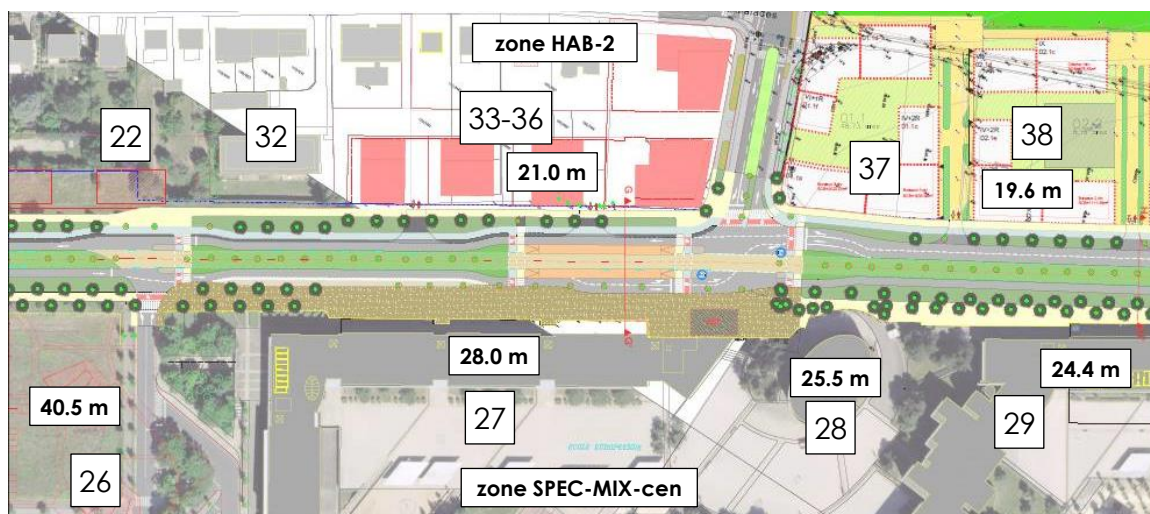


Figure 4.7 Points d'évaluation, partie 4

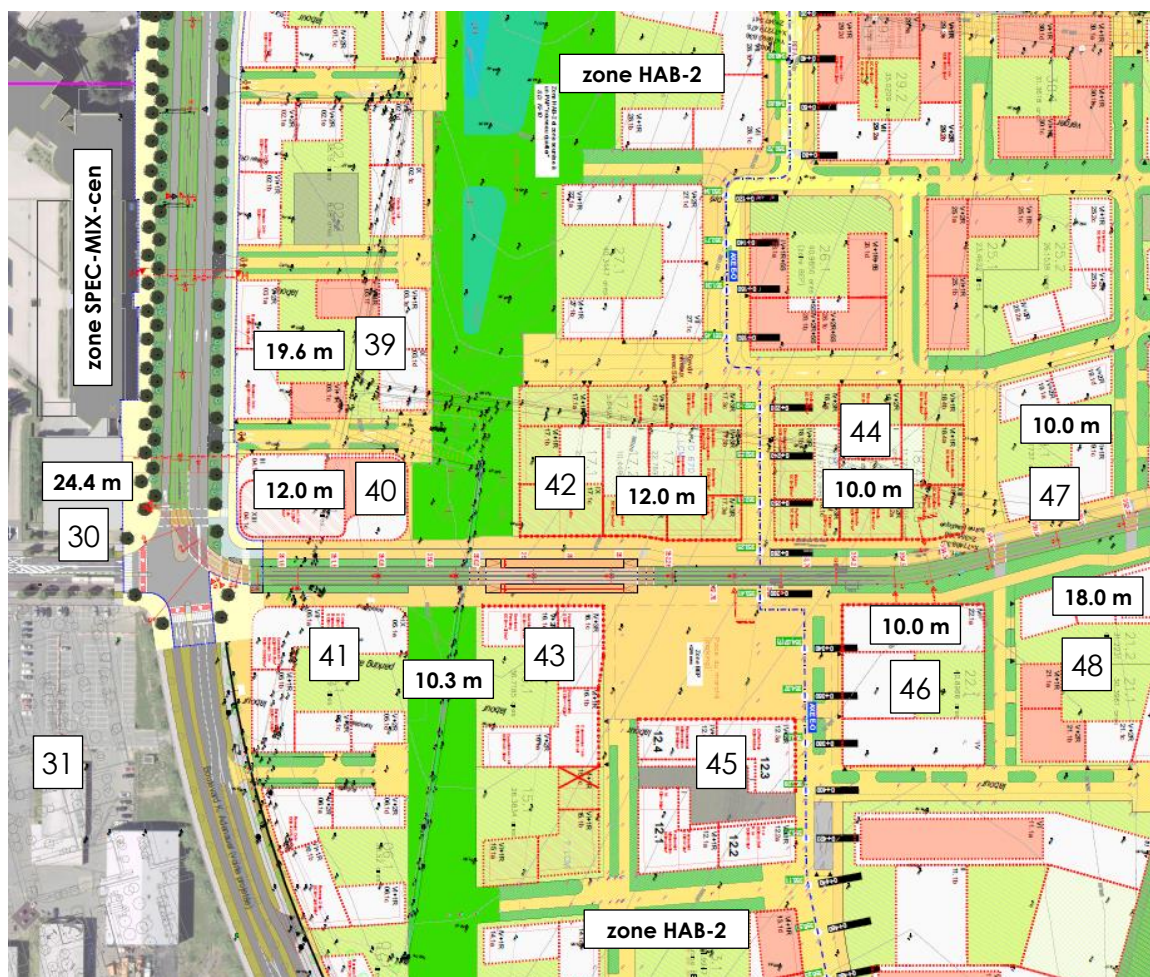


Figure 4.8 Points d'évaluation, partie 5

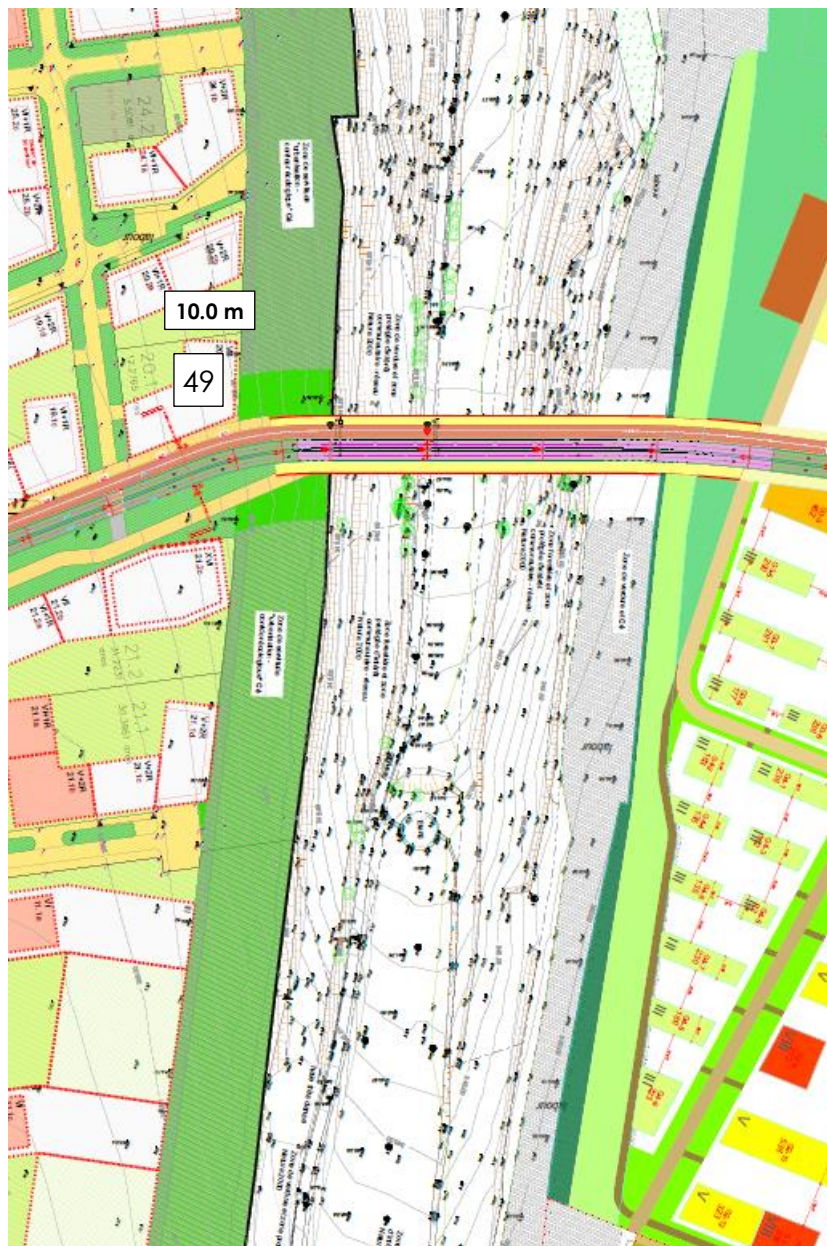


Figure 4.9 Points d'évaluation, partie 6

Pour le bâtiment 42, le calcul a été effectué en tenant compte de la présence d'un appareil de voie.

Les chiffres en rouge montrent un dépassement de la limite. Les chiffres en orange, pour les valeurs A_u , montrent un dépassement de la limite A_u . Comme un dépassement de la limite A_u nécessite l'évaluation de la limite A_r , un chiffre orange ne signifie pas directement un dépassement de la norme DIN 4150-2. Il est constaté que, à cause du faible nombre de passages par jour et par nuit, la norme DIN 4150-2 est toujours respectée. Le respect du critère pour le bruit solide est plus contraignant. Toutefois, comme expliqué au chapitre 1.1, il est proposé de dimensionner pour respecter la limite A_u .

					Vibrations							Bruit solidien	
Point	Bâtiment	Zone DIN 4150-2	Vitesse	Distance	KB _{FM} max	Limite A _U (jour)	Limite A _U (nuit)	KB _{FTr} jour	Limite A _r	KB _{FTr} nuit	Limite A _r	Niveau	Limite
1a	Commercial	3	40	30,0	0,02	0,20	0,15	0,00	0,1	0,00	0,07	34,5	45,0
1b	Commercial	3	40	22,2	0,03	0,20	0,15	0,00	0,1	0,00	0,07	41,7	45,0
1c	Commercial	3	40	19,0	0,04	0,20	0,15	0,00	0,1	0,00	0,07	44,7	45,0
2a	Public	3	40	12,0	0,11	0,20	0,15	0,04	0,1	0,02	0,07	53,1	45,0
2b	Public	3	40	14,0	0,08	0,20	0,15	0,00	0,1	0,00	0,07	50,6	45,0
2c	Public	3	40	8,2	0,20	0,20	0,15	0,07	0,1	0,04	0,07	59,6	45,0
2d	Public	3	40	34,5	0,01	0,20	0,15	0,00	0,1	0,00	0,07	31,4	45,0
3	Inconnu	4	40	22,0	0,03	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	41,7	40,0
4	Inconnu	4	40	11,2	0,12	0,15	0,1	0,05	0,07	0,03	0,05	54,7	40,0
5	Inconnu	4	40	12,0	0,11	0,15	0,1	0,04	0,07	0,02	0,05	53,1	40,0
6	Inconnu	4	40	18,0	0,05	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	45,8	40,0
7	Inconnu	4	40	15,0	0,07	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	49,3	40,0
8	Inconnu	4	40	15,0	0,07	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	49,3	40,0
9	Inconnu	4	40	11,5	0,13	0,15	0,1	0,05	0,07	0,03	0,05	52,1	40,0
10-15	Résidentiel	4	40	18,2	0,06	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	43,8	40,0
16	Inconnu	4	40	34,0	0,01	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	28,8	40,0
17	Résidentiel	4	40	40,0	0,01	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	24,3	40,0
18	Résidentiel	4	40	21,0	0,04	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	40,5	40,0

					Vibrations							Bruit solidien	
Point	Bâtiment	Zone DIN 4150-2	Vitesse	Distance	KB _{FM} max	Limite A _U (jour)	Limite A _U (nuit)	KB _{FTr} jour	Limite A _r	KB _{FTr} nuit	Limite A _r	Niveau	Limite
19-20	Résidentiel	4	40	26,8	0,02	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	34,7	40,0
21-22	Résidentiel	4	40	21,0	0,04	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	40,5	40,0
23	Inconnu	4	40	14,4	0,09	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	48,1	40,0
24-25	Inconnu	4	40	15,5	0,08	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	46,7	40,0
26	Inconnu	4	40	40,5	0,01	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	24,3	40,0
27	Commercial	3	40	28,0	0,00	0,20	0,15	0,00	0,10	0,00	0,07	24,3	45,0
28	Commercial	3	40	25,5	0,00	0,20	0,15	0,00	0,10	0,00	0,07	25,3	45,0
29	Commercial	3	40	24,4	0,00	0,20	0,15	0,00	0,10	0,00	0,07	27,1	45,0
30	Inconnu	4	15	24,4	0,01	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	21,5	40,0
32	Résidentiel	4	40	40,0	0,00	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	15,5	40,0
33-36	Résidentiel	4	40	21,0	0,01	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	30,4	40,0
37-38	Résidentiel	4	40	19,6	0,01	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	32,8	40,0
39	Résidentiel	4	40	19,6	0,03	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	35,1	40,0
40	Résidentiel	4	35	12,0	0,06	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	42,9	40,0
41	Résidentiel	4	35	10,3	0,08	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	45,9	40,0
42	Résidentiel	4	30	12,0	0,17	0,15	0,1	0,06	0,07	0,03	0,05	51,6	40,0
43	Résidentiel	4	30	10,3	0,07	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	44,6	40,0
44	Résidentiel	4	30	10,3	0,07	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	44,6	40,0

					Vibrations							Bruit solide	
Point	Bâtiment	Zone DIN 4150-2	Vitesse	Distance	KB _{FM} max	Limite A _U (jour)	Limite A _U (nuit)	KB _{FT} jour	Limite A _r	KB _{FT} nuit	Limite A _r	Niveau	Limite
45	Résidentiel	4	30	55,0	0,01	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	15,6	40,0
46	Résidentiel	4	30	10,0	0,07	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	44,6	40,0
47	Résidentiel	4	30	10,0	0,07	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	44,6	40,0
48	Résidentiel	4	30	18,0	0,03	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	34,2	40,0
49	Résidentiel	4	30	10,0	0,07	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	44,6	40,0

Tableau 4.1 Résultats de calcul

4.3 MESURES DE MITIGATION

L'évaluation a montré que, dans plusieurs zones, une voie de référence ne suffira pas pour garantir que les vibrations et le bruit solidien dans les bâtiments respecteront les réglementations applicables. Des mesures de mitigation s'imposent. Comme décrit dans le paragraphe 3.4, 3 systèmes sont proposés ; le système dit « -8 dB », « -16 dB » et le système « -20 dB » (une dalle flottante).

Les tableaux mit1-mit3 (tableaux 4.2 à 4.4) donnent les résultats de calcul pour ces 3 niveaux de mitigation. Il y a lieu de noter que, pour le bâtiment 42, au niveau de l'appareil de voie, le niveau vibratoire augmente en appliquant un système de mitigation plus performant, comme le système « -16 dB » et « -20 dB ». Cette augmentation est causée par le pic de résonance du système (cf. figure 3.11). Typiquement, un tel pic n'est pas observé lors des mesures in situ. Il est donc recommandé de préconiser un système « -20 dB » pour l'appareil de voie.

Point	Bâtiment	Zone DIN4150-2	Vitesse	Distance	Vibrations							Bruit solidien	
					KB _{FMax}	Limite A _U (jour)	Limite A _U (nuit)	KB _{FTr} jour	Limite A _r	KB _{FTr} nuit	Limite A _r	Niveau	Limite
1a	Commercial	3	40	30,0	0,02	0,20	0,15	0,00	0,1	0,00	0,07	29,7	45,0
1b	Commercial	3	40	22,2	0,03	0,20	0,15	0,00	0,1	0,00	0,07	35,8	45,0
1c	Commercial	3	40	19,0	0,04	0,20	0,15	0,00	0,1	0,00	0,07	38,5	45,0
2a	Public	3	40	12,0	0,09	0,20	0,15	0,00	0,1	0,00	0,07	46,0	45,0
2b	Public	3	40	14,0	0,07	0,20	0,15	0,00	0,1	0,00	0,07	43,6	45,0
2c	Public	3	40	8,2	0,15	0,20	0,15	0,06	0,1	0,03	0,07	51,6	45,0
2d	Public	3	40	34,5	0,01	0,20	0,15	0,00	0,1	0,00	0,07	26,7	45,0
3	Inconnu	4	40	22,0	0,03	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	35,8	40,0
4	Inconnu	4	40	11,2	0,10	0,15	0,1	0,04	0,07	0,02	0,05	47,2	40,0
5	Inconnu	4	40	12,0	0,09	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	46,0	40,0
6	Inconnu	4	40	18,0	0,05	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	39,4	40,0
7	Inconnu	4	40	15,0	0,07	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	42,5	40,0
8	Inconnu	4	40	15,0	0,07	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	42,5	40,0
9	Inconnu	4	40	11,5	0,14	0,15	0,1	0,05	0,07	0,03	0,05	47,4	40,0
10-15	Résidentiel	4	40	18,2	0,06	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	39,8	40,0
16	Inconnu	4	40	34,0	0,01	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	25,9	40,0
17	Résidentiel	4	40	40,0	0,01	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	21,7	40,0
18	Résidentiel	4	40	21,0	0,04	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	36,8	40,0

					Vibrations							Bruit solide	
Point	Bâtiment	Zone DIN4150-2	Vitesse	Distance	KB _{FMax}	Limite A _u (jour)	Limite A _u (nuit)	KB _{FTr} jour	Limite A _r	KB _{FTr} nuit	Limite A _r	Niveau	Limite
19-20	Résidentiel	4	40	26,8	0,02	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	31,4	40,0
21-22	Résidentiel	4	40	21,0	0,04	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	36,8	40,0
23	Inconnu	4	40	14,4	0,09	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	44,6	40,0
24-25	Inconnu	4	40	15,5	0,08	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	42,4	40,0
26	Inconnu	4	40	40,5	0,01	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	21,7	40,0
27	Commercial	3	40	28,0	0,00	0,20	0,15	0,00	0,10	0,00	0,07	15,2	45,0
28	Commercial	3	40	25,5	0,00	0,20	0,15	0,00	0,10	0,00	0,07	17,1	45,0
29	Commercial	3	40	24,4	0,00	0,20	0,15	0,00	0,10	0,00	0,07	18,1	45,0
30	Inconnu	4	15	24,4	0,01	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	19,3	40,0
32	Résidentiel	4	40	40,0	0,00	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	6,1	40,0
33-36	Résidentiel	4	40	21,0	0,00	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	21,3	40,0
37-38	Résidentiel	4	40	19,6	0,00	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	22,3	40,0
39	Résidentiel	4	40	19,6	0,04	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	31,9	40,0
40	Résidentiel	4	35	12,0	0,07	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	38,1	40,0
41	Résidentiel	4	35	10,3	0,09	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	40,5	40,0
42	Résidentiel	4	30	12,0	0,18	0,15	0,1	0,07	0,07	0,04	0,05	46,8	40,0
43	Résidentiel	4	30	10,3	0,07	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	39,2	40,0
44	Résidentiel	4	30	10,3	0,07	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	39,2	40,0

Point	Bâtiment	Zone DIN4150-2	Vitesse	Distance	Vibrations							Bruit solidien	
					KB _{FMax}	Limite A _U (jour)	Limite A _U (nuit)	KB _{FTr} jour	Limite A _r	KB _{FTr} nuit	Limite A _r	Niveau	Limite
45	Résidentiel	4	30	55,0	0,01	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	15,6	40,0
46	Résidentiel	4	30	10,0	0,07	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	39,2	40,0
47	Résidentiel	4	30	10,0	0,07	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	39,2	40,0
48	Résidentiel	4	30	18,0	0,03	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	30,6	40,0
49	Résidentiel	4	30	10,0	0,07	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	39,2	40,0

Tableau 4.2 Résultats avec mesures de mitigation – « -8 dB »

					Vibrations							Bruit solide	
Point	Bâtiment	Zone DIN4150-2	Vitesse	Distance	KB _{FMax}	Limite A _U (jour)	Limite A _U (nuit)	KB _{FTr} jour	Limite A _r	KB _{FTr} nuit	Limite A _r	Niveau	Limite
1a	Commercial	3	40	30,0	0,01	0,20	0,15	0,00	0,1	0,00	0,07	17,8	45,0
1b	Commercial	3	40	22,2	0,01	0,20	0,15	0,00	0,1	0,00	0,07	24,3	45,0
1c	Commercial	3	40	19,0	0,02	0,20	0,15	0,00	0,1	0,00	0,07	27,1	45,0
2a	Public	3	40	12,0	0,03	0,20	0,15	0,00	0,1	0,00	0,07	35,0	45,0
2b	Public	3	40	14,0	0,03	0,20	0,15	0,00	0,1	0,00	0,07	32,4	45,0
2c	Public	3	40	8,2	0,06	0,20	0,15	0,00	0,1	0,00	0,07	40,9	45,0
2d	Public	3	40	34,5	0,01	0,20	0,15	0,00	0,1	0,00	0,07	14,7	45,0
3	Inconnu	4	40	22,0	0,01	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	24,3	40,0
4	Inconnu	4	40	11,2	0,04	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	36,3	40,0
5	Inconnu	4	40	12,0	0,03	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	35,0	40,0
6	Inconnu	4	40	18,0	0,02	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	28,1	40,0
7	Inconnu	4	40	15,0	0,03	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	31,3	40,0
8	Inconnu	4	40	15,0	0,03	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	31,3	40,0
9	Inconnu	4	40	11,5	0,06	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	36,1	40,0
10-15	Résidentiel	4	40	18,2	0,03	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	28,3	40,0
16	Inconnu	4	40	34,0	0,01	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	14,4	40,0
17	Résidentiel	4	40	40,0	0,00	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	10,1	40,0
18	Résidentiel	4	40	21,0	0,02	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	25,3	40,0

					Vibrations							Bruit solide	
Point	Bâtiment	Zone DIN4150-2	Vitesse	Distance	KB _{FMax}	Limite A _U (jour)	Limite A _U (nuit)	KB _{FTr} jour	Limite A _r	KB _{FTr} nuit	Limite A _r	Niveau	Limite
19-20	Résidentiel	4	40	26,8	0,01	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	19,9	40,0
21-22	Résidentiel	4	40	21,0	0,02	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	25,3	40,0
23	Inconnu	4	40	14,4	0,04	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	32,1	40,0
24-25	Inconnu	4	40	15,5	0,04	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	31,1	40,0
26	Inconnu	4	40	40,5	0,00	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	10,1	40,0
27	Commercial	3	40	28,0	0,00	0,20	0,15	0,00	0,10	0,00	0,07	5,6	45,0
28	Commercial	3	40	25,5	0,01	0,20	0,15	0,00	0,10	0,00	0,07	8,1	45,0
29	Commercial	3	40	24,4	0,01	0,20	0,15	0,00	0,10	0,00	0,07	8,6	45,0
30	Inconnu	4	15	24,4	0,02	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	13,1	40,0
32	Résidentiel	4	40	40,0	0,00	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	-1,9	40,0
33-36	Résidentiel	4	40	21,0	0,01	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	11,6	40,0
37-38	Résidentiel	4	40	19,6	0,01	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	12,6	40,0
39	Résidentiel	4	40	19,6	0,08	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	24,8	40,0
40	Résidentiel	4	35	12,0	0,16	0,15	0,1	0,06	0,07	0,03	0,05	30,6	40,0
41	Résidentiel	4	35	10,3	0,20	0,15	0,1	0,07	0,07	0,04	0,05	32,8	40,0
42	Résidentiel	4	30	12,0	0,42	0,15	0,1	0,16	0,07	0,09	0,05	40,3	40,0
43	Résidentiel	4	30	10,3	0,17	0,15	0,1	0,06	0,07	0,03	0,05	31,5	40,0
44	Résidentiel	4	30	10,3	0,17	0,15	0,1	0,06	0,07	0,03	0,05	31,5	40,0

					Vibrations							Bruit solidien	
Point	Bâtiment	Zone DIN4150-2	Vitesse	Distance	KB _{FMax}	Limite A _U (jour)	Limite A _U (nuit)	KB _{FTr} jour	Limite A _r	KB _{FTr} nuit	Limite A _r	Niveau	Limite
45	Résidentiel	4	30	55,0	0,02	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	-4,4	40,0
46	Résidentiel	4	30	10,0	0,17	0,15	0,1	0,06	0,07	0,03	0,05	31,5	40,0
47	Résidentiel	4	30	10,0	0,17	0,15	0,1	0,06	0,07	0,03	0,05	31,5	40,0
48	Résidentiel	4	30	18,0	0,07	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	23,8	40,0
49	Résidentiel	4	30	10,0	0,17	0,15	0,1	0,06	0,07	0,03	0,05	31,5	40,0

Tableau 4.3 Résultats avec mesures de mitigation – « -16 dB »

					Vibrations							Bruit solide	
Point	Bâtiment	Zone DIN4150-2	Vitesse	Distance	KB _{FMax}	Limite A _u (jour)	Limite A _u (nuit)	KB _{FTr} jour	Limite A _r	KB _{FTr} nuit	Limite A _r	Niveau	Limite
1a	Commercial	3	40	30,0	0,01	0,20	0,15	0,00	0,1	0,00	0,07	14,4	45,0
1b	Commercial	3	40	22,2	0,01	0,20	0,15	0,00	0,1	0,00	0,07	20,8	45,0
1c	Commercial	3	40	19,0	0,02	0,20	0,15	0,00	0,1	0,00	0,07	23,7	45,0
2a	Public	3	40	12,0	0,03	0,20	0,15	0,00	0,1	0,00	0,07	31,6	45,0
2b	Public	3	40	14,0	0,03	0,20	0,15	0,00	0,1	0,00	0,07	29,0	45,0
2c	Public	3	40	8,2	0,06	0,20	0,15	0,00	0,1	0,00	0,07	37,5	45,0
2d	Public	3	40	34,5	0,01	0,20	0,15	0,00	0,1	0,00	0,07	11,1	45,0
3	Inconnu	4	40	22,0	0,01	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	20,8	40,0
4	Inconnu	4	40	11,2	0,04	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	32,9	40,0
5	Inconnu	4	40	12,0	0,03	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	31,6	40,0
6	Inconnu	4	40	18,0	0,02	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	24,7	40,0
7	Inconnu	4	40	15,0	0,03	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	27,9	40,0
8	Inconnu	4	40	15,0	0,03	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	27,9	40,0
9	Inconnu	4	40	11,5	0,04	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	32,4	40,0
10-15	Résidentiel	4	40	18,2	0,02	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	24,6	40,0
16	Inconnu	4	40	34,0	0,01	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	10,7	40,0
17	Résidentiel	4	40	40,0	0,00	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	6,1	40,0
18	Résidentiel	4	40	21,0	0,02	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	21,6	40,0

Point	Bâtiment	Zone DIN4150-2	Vitesse	Distance	Vibrations							Bruit solide	
					KB _{FMax}	Limite A _U (jour)	Limite A _U (nuit)	KB _{FTr} jour	Limite A _r	KB _{FTr} nuit	Limite A _r	Niveau	Limite
19-20	Résidentiel	4	40	26,8	0,01	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	16,2	40,0
21-22	Résidentiel	4	40	21,0	0,02	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	21,6	40,0
23	Inconnu	4	40	14,4	0,03	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	28,7	40,0
24-25	Inconnu	4	40	15,5	0,03	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	27,3	40,0
26	Inconnu	4	40	40,5	0,00	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	6,4	40,0
27	Commercial	3	40	28,0	0,01	0,20	0,15	0,00	0,10	0,00	0,07	2,8	45,0
28	Commercial	3	40	25,5	0,01	0,20	0,15	0,00	0,10	0,00	0,07	4,6	45,0
29	Commercial	3	40	24,4	0,01	0,20	0,15	0,00	0,10	0,00	0,07	5,7	45,0
30	Inconnu	4	15	24,4	0,02	0,15	0,1	0,00	0,07	0,01	0,05	11,0	40,0
32	Résidentiel	4	40	40,0	0,00	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	-1,9	40,0
33-36	Résidentiel	4	40	21,0	0,01	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	8,7	40,0
37-38	Résidentiel	4	40	19,6	0,01	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	10,1	40,0
39	Résidentiel	4	40	19,6	0,10	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	22,9	40,0
40	Résidentiel	4	35	12,0	0,19	0,15	0,1	0,07	0,07	0,04	0,05	28,7	40,0
41	Résidentiel	4	35	10,3	0,24	0,15	0,1	0,09	0,07	0,05	0,05	30,3	40,0
42	Résidentiel	4	30	12,0	0,52	0,15	0,1	0,20	0,07	0,11	0,05	38,4	40,0
43	Résidentiel	4	30	10,3	0,21	0,15	0,1	0,08	0,07	0,04	0,05	29,0	40,0
44	Résidentiel	4	30	10,3	0,21	0,15	0,1	0,08	0,07	0,04	0,05	29,0	40,0

					Vibrations							Bruit solidien	
Point	Bâtiment	Zone DIN4150-2	Vitesse	Distance	KB _{FMax}	Limite A _U (jour)	Limite A _U (nuit)	KB _{FTr} jour	Limite A _r	KB _{FTr} nuit	Limite A _r	Niveau	Limite
45	Résidentiel	4	30	55,0	0,02	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	-4,4	40,0
46	Résidentiel	4	30	10,0	0,21	0,15	0,1	0,08	0,07	0,04	0,05	29,0	40,0
47	Résidentiel	4	30	10,0	0,21	0,15	0,1	0,08	0,07	0,04	0,05	29,0	40,0
48	Résidentiel	4	30	18,0	0,09	0,15	0,1	0,00	0,07	0,00	0,05	22,0	40,0
49	Résidentiel	4	30	10,0	0,21	0,15	0,1	0,08	0,07	0,04	0,05	29,0	40,0

Tableau 4.4 Résultats avec mesures de mitigation – « -20 dB »

Les conclusions pour les types de pose de voies, sélectionnés sur la base des calculs et des critères applicables, sont données dans les figures 4.10 à 4.14. Les zones indiquées en bleu sont des zones à exécuter avec un système « -8 dB ». Les zones indiquées en jaune sont des zones à exécuter avec un système « -16 dB », et, finalement, les zones indiquées en rouge avec un système « -20 dB ».

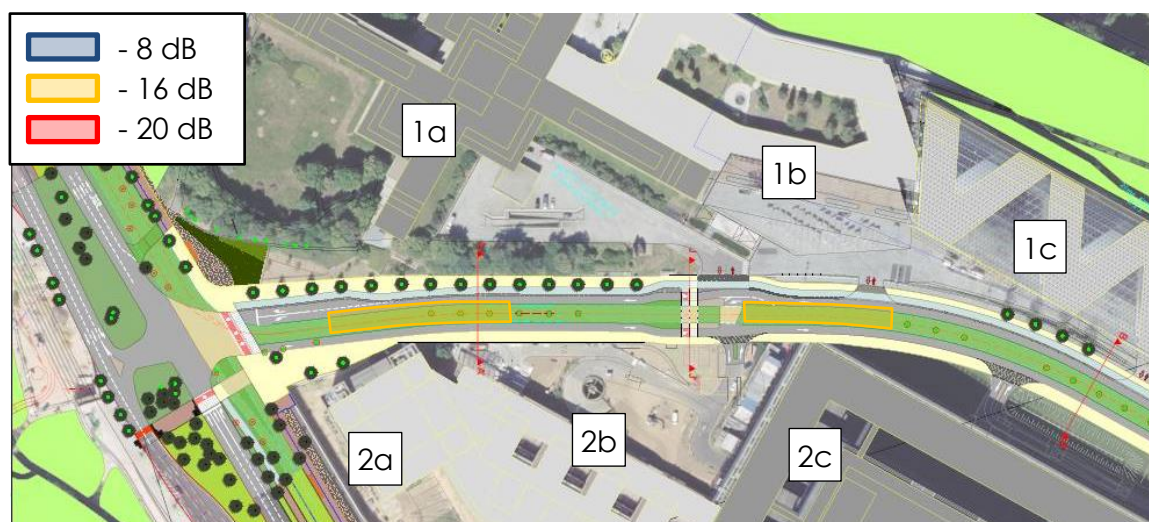


Figure 4.10 Mesures de mitigation, partie 1



Figure 4.11 Mesures de mitigation, partie 2



Figure 4.12 Mesures de mitigation, partie 3

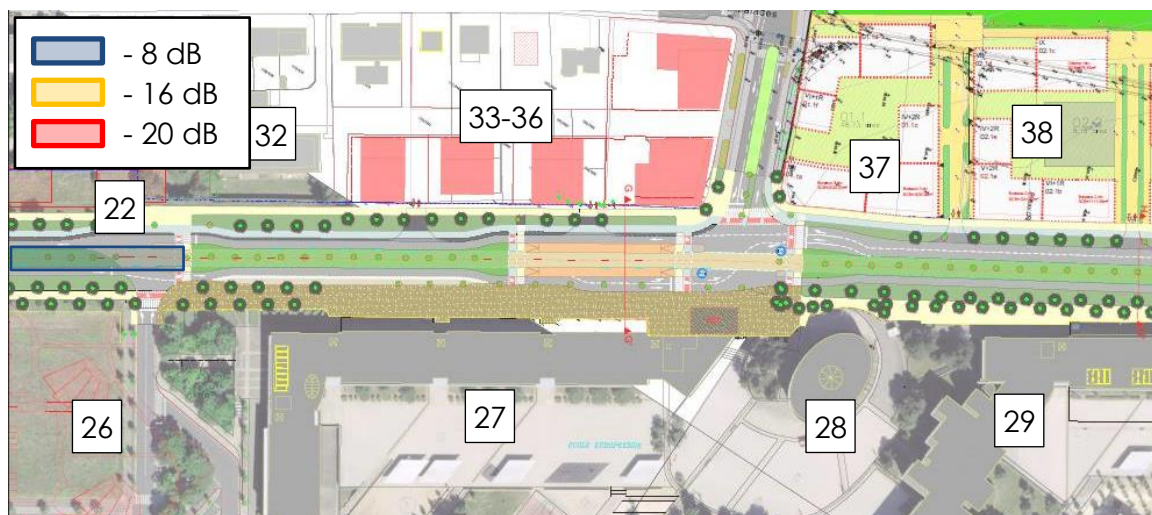


Figure 4.13 Mesures de mitigation, partie 4

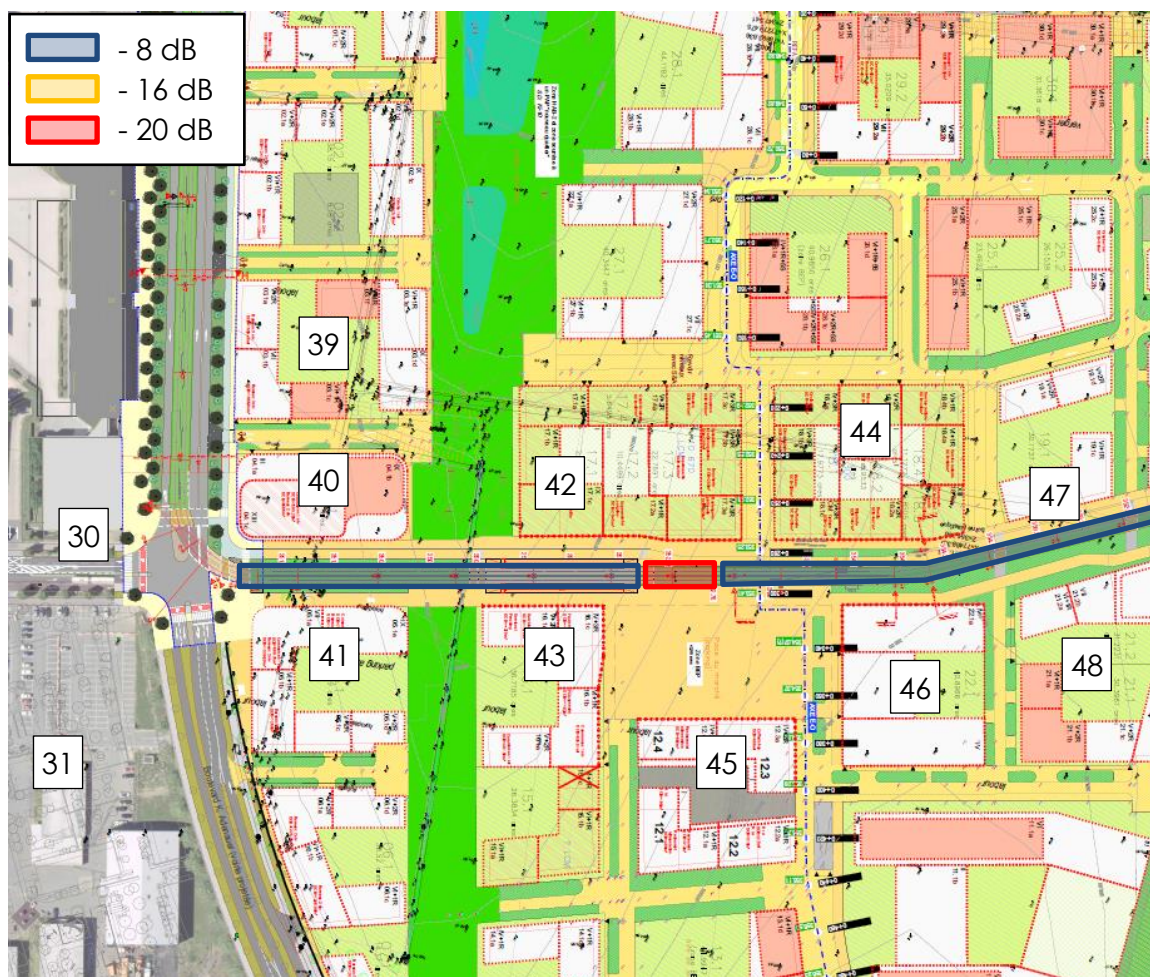


Figure 4.14 Mesures de mitigation, partie 5

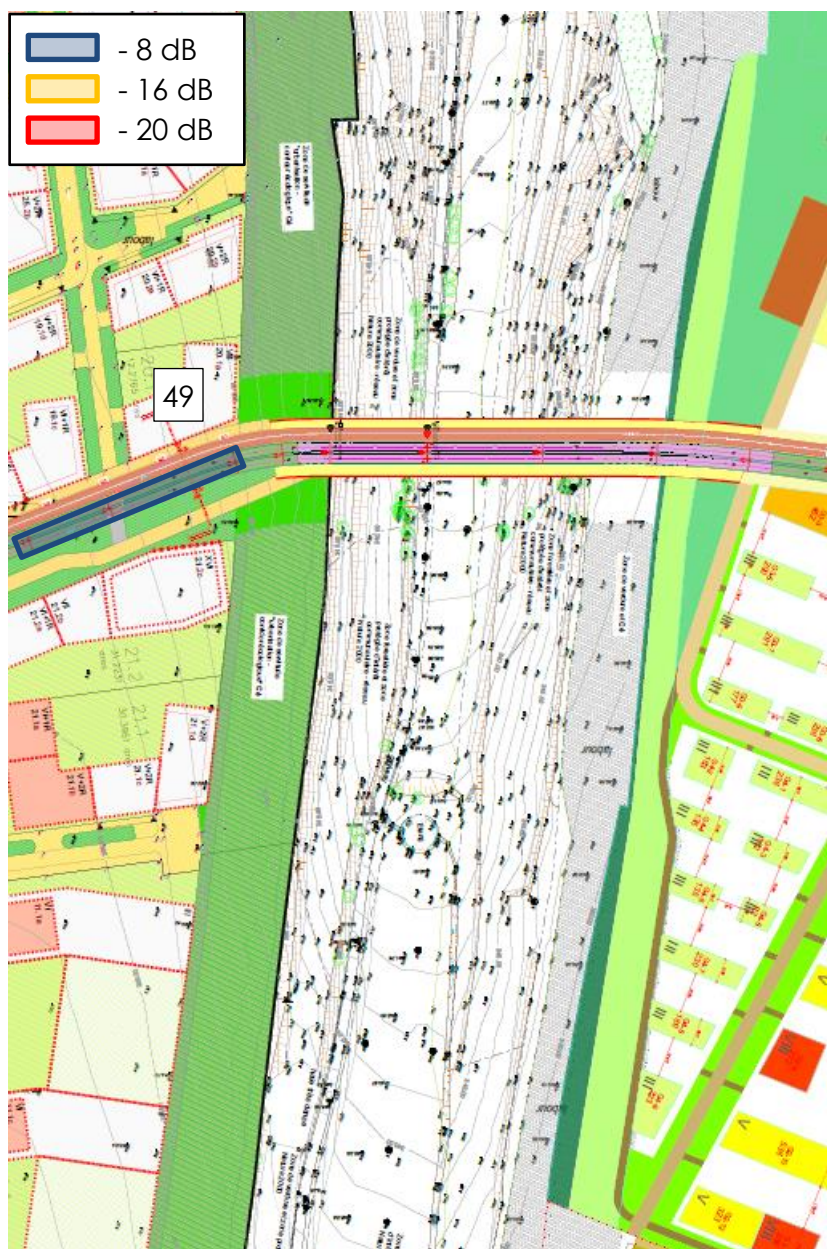


Figure 4.15 Mesures de mitigation, partie 6

4.4

EFFET CUMULÉ

Au niveau du carrefour Boulevard Konrad Adenauer / Avenue John. F Kennedy, la nouvelle voie peut provoquer des effets cumulés avec la ligne existante. Il y a lieu de noter que l'impact principal de la ligne, comme a été démontré par les calculs, est le bruit solidien. Aussi bien l'évaluation du bruit solidien que l'évaluation des vibrations (limite A_v de la norme DIN 4150-2) se font sur la base des niveaux maximaux pendant le passage d'un tram. Sauf quand 2 trams passent au même temps, des effets cumulés ne sont pas pertinents.

La figure 4.16 montre les voies futures et existantes par rapport au bâtiment de la Cour de justice. La distance minimale entre la voie existante et le bâtiment est d'environ 23 m. Sur la base des calculs effectués pour la nouvelle voie, en considérant que la configuration de la voie et les véhicules sont similaires, cette distance est assez importante afin de ne pas provoquer des dépassements des normes applicables.

Au niveau du coin du bâtiment, la distance minimale entre la future voie et le bâtiment est seulement 12 m. Toutefois, une voie antivibratoire est préconisée pour la future voie, afin de ne pas causer des dépassements.

Comme la future voie et la voie existante ne provoquent pas des dépassements, un effet cumulé n'est pas attendu.

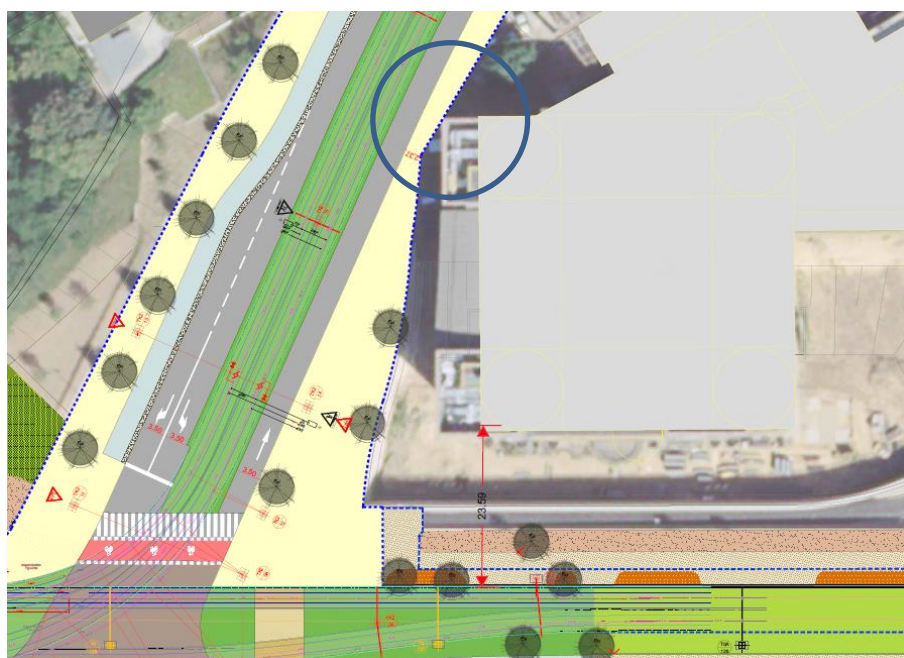


Figure 4.16 Effet cumulé – carrefour Boulevard Konrad Adenauer / Av. John F. Kennedy

5 PHASE CHANTIER

Ce chapitre concerne la phase chantier de ce projet ; les incidences vibratoires des procédés de travail susceptibles d'être mis en œuvre seront qualifiés. Il ne s'agit pas d'une étude détaillée qui prend en compte le phasage détaillé du projet, mais plutôt une vue générale.

5.1 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 DIN 4150-1 (1999) : « *Vibrations dans les bâtiments : 1. Prédiction des paramètres vibratoires* ».

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 démolitions et d'excavations, on peut considérer des sources de type impulsionnel. Même les forages et 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 :

- $n = 0.5$ (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 :

- $\alpha = 0.025$ ($f : 60 \text{ Hz}$; $v_s = 1\,500 \text{ m/s}$)

L'annexe E 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 3.3. 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. Suite à cela, on pourrait accepter qu'un contrôle vibratoire se fasse au droit des fondations.

5.2 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

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

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 inférieur à 78 jours, des niveaux plus élevés sont acceptables (§ 6.5.4 de cette norme et tableau 2).

Remarque : $A_u \leq 0.60 = \approx 1 \text{ mm/s}$.

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

	$6j < D \leq 26 j$	$26j < D \leq 78 j$
A_u	0.80	0.60
A_o	5	5
A_r	0.60	0.40

Tableau 5.1

(*) 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
- Designier 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.

5.3 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
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 5.2

5.4 PHASAGE

Le phasage n'est actuellement pas connu en détail. Les étapes de construction sont les suivants ;

- Pour la section entre Pfaffenthal et l'entrée du PAP Laangfur, ce qui concerne un réaménagement entier de la voirie (de façade à façade)
 - 1) Terrassement en tranchée pour déplacement et pose de réseau
 - 2) Terrassement en masse pour les sous-stations de traction
 - 3) Terrassement pour les coffres de chaussées et des voies
 - 4) Travaux de bétonnage du local SST et de l'assise des voies
 - 5) Travaux de pose de réseaux
 - 6) Travaux de remblaiement des tranchées
 - 7) Travaux de coffre de chaussée
 - 8) Travaux de pose des voies
 - 9) Travaux de forage de micropieux
 - 10) Travaux de montage des mâts pour la ligne aérienne de contact
 - 11) Travaux de pose des finitions route et trottoirs
 - 12) Travaux de plantation
- Dans le périmètre du PAP Laangfur
 - 1) Terrassement en tranchée pour réalisation des multitubulaires et chambres tram en plateforme
 - 13) Travaux de pose des multitubulaires tram
 - 2) Terrassement en masse pour les sous-stations de traction

- 4) Travaux de bétonnage du local SST et de l'assise des voies
- 6) Travaux de remblaiement des tranchées
- 8) Travaux de pose des voies
- 9) Travaux de forage de micropieux
- 10) Travaux de montage des mâts pour la ligne aérienne de contact
- 11) Travaux de pose des finitions revêtement plateforme

Certains de ces étapes sont très similaires du point de vue vibratoire, selon les engins qui sont susceptibles à être mis en œuvre. Pour cette raison, ils sont groupés en plusieurs scénarios, décrits dans le chapitre suivant.

Additionnellement, certains procédés de travail ne provoquent généralement pas des niveaux vibratoires importants. Seulement les procédés qui risquent de provoquer des vibrations, sont analysés ; il s'agit principalement des travaux de terrassement et de forage des micropieux.

5.5 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.

5.6 SCÉNARIOS À ÉTUDIER

Lors de tous les scénarios, des hypothèses sont proposées concernant le type et le nombre d'engins à considérer, à défaut de données plus spécifiques.

Des sources fixes, comme des pompes et des groupes, ne sont pas considérées. Généralement, ces sources fixes ne provoquent pas des vibrations perceptibles dans les bâtiments adjacents.

5.6.1 Scénario 1 – terrassement superficiel

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

Étapes correspondantes

- 1) Terrassement en tranchée pour déplacement et pose de réseau
- 3) Terrassement pour les coffres de chaussées et des voies
- 6) Travaux de remblaiement des tranchées

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

5.6.2 Scénario 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

- 1) Terrassement en tranchée pour déplacement et pose de réseau
- 3) Terrassement pour les coffres de chaussées et des voies
- 6) Travaux de remblaiement des tranchées

Travaux

- Excavation et terrassement des couches de sol type 7, à l'aide d'une pelle hydraulique munie d'un brise-roche
- Enlèvement du sol à l'aide de camions

Sources

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

5.6.3 Scénario 3 – terrassement superficiel ponctuel

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

Contrairement au scénario 1, il s'agit des travaux d'excavation ponctuels, dans un endroit bien spécifié.

Étapes correspondantes

- 2) Terrassement en masse pour les sous-stations de traction

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

5.6.4 Scénario 4 – terrassement dans la roche ponctuel

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

Contrairement au scénario 2, il s'agit des travaux d'excavation ponctuels, dans un endroit bien spécifié.

Étapes correspondantes

- 2) Terrassement en masse pour les sous-stations de traction

Travaux

- Excavation et terrassement des couches de sol type 7, à l'aide d'une pelle hydraulique munie d'un brise-roche
- Enlèvement du sol à l'aide de camions

Sources

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

5.6.5 Scénario 5 – 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

- 4) Travaux de bétonnage du local SST et de l'assise des voies
- 5) Travaux de pose de réseaux
- 7) Travaux de coffre de chaussée
- 8) Travaux de pose des voies
- 10) Travaux de montage des mâts pour la ligne aérienne de contact
- 11) Travaux de pose des finitions route et trottoirs
- 12) Travaux de plantation
- 13) Travaux de pose des multitubulaires tram

Travaux

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

Sources

- Grue
- Camions

5.6.6 Scénario 6 – forage des micropieux

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

Étapes correspondantes

- 9) Forage des micropieux

Travaux

- Forage des micropieux

Sources

- Foreuse

5.7 BILAN DES DIFFÉRENTS IMPACTS

5.7.1 Actions d'isolation dans le projet de base

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 acoustiques).

5.7.2 Impact vibratoire

Ce paragraphe résume le contenu de chaque scénario et donne l'évaluation de l'impact vibratoire par scénario. Pour chaque scénario, les hypothèses de calcul sont décrites.

5.7.2.1 Scénario 1 – terrassement superficiel

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

Étapes correspondantes

- 1) Terrassement en tranchée pour déplacement et pose de réseau
- 3) Terrassement pour les coffres de chaussées et des voies
- 6) Travaux de remblaiement des tranchées

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 moyenne

source	travaux	L _v à 7.5 m [mm/s]	Distance de sécurité [m]
Pelle hydraulique	terrassement	0.8	6

Tableau 5.3

Discussion

Dans la zone entre Pfaffenthal et l'entrée du PAP Laangfur, la distance entre le chantier et les bâtiments peut être inférieure à 6 m, vu l'aménagement de façade à façade. Toutefois, les niveaux vibratoires diminuent rapidement après quelques mètres et il est attendu que les dépassements seront donc rares.

Dans la zone du PAP Laangfur, la distance entre le chantier et les bâtiments est supérieure à 6 m ; pas de dépassements.

5.7.2.2 Scénario 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

- 1) Terrassement en tranchée pour déplacement et pose de réseau
- 3) Terrassement pour les coffres de chaussées et des voies
- 6) Travaux de remblaiement des tranchées

Travaux

- Excavation et terrassement des couches de sol type 7, à l'aide d'une pelle hydraulique munie d'un brise-roche
- 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 5.4

Discussion

Dans tout le tronçon, l'utilisation d'un brise-roche est à réduire autant que possible, à cause de la distance de sécurité importante de 25 m. Des dépassements sont attendus.

Comme alternative, une fraise de petite taille peut être utilisée pour les sols de type 7.

On est également obligé d'avertir les occupants, suivant la procédure décrite dans la norme DIN 4150-2, § 6.5.4, Stufe II.

5.7.2.3 Scénario 3 – terrassement superficiel ponctuel

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

Contrairement au scénario 1, il s'agit des travaux d'excavation ponctuels, dans un endroit bien spécifié.

Étapes correspondantes

- 2) Terrassement en masse pour les sous-stations de traction

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

Dans ce cas, la position exacte des travaux par rapport aux récepteurs les plus proches est connue. Cela permet d'effectuer l'évaluation spécifiquement pour ces récepteurs.

- Source dominante : pelle mécanique
- Propagation
 - Source ponctuelle
 - Propagation moyenne

point	distance [m]	source	L_v à 7.5 m [mm/s]	v_{RMS} [mm/s]
Côté sud – immeuble	26	terrassement	0.8	0.2
Côté nord - résidences	40	terrassement	0.8	< 0.1

Tableau 5.5

Discussion

Pas de dépassements.

5.7.2.4 Scénario 4 – terrassement dans la roche ponctuel

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

Contrairement au scénario 2, il s'agit des travaux d'excavation ponctuels, dans un endroit bien spécifié.

Étapes correspondantes

- 1) Terrassement en masse pour les sous-stations de traction

Travaux

- Excavation et terrassement des couches de sol type 7, à l'aide d'une pelle hydraulique munie d'un brise-roche
- Enlèvement du sol à l'aide de camions

Sources

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

Niveaux vibratoires

Dans ce cas, la position exacte des travaux par rapport aux récepteurs les plus proches est connue. Cela permet d'effectuer l'évaluation spécifiquement pour ces récepteurs.

- Source dominante : pelle mécanique munie d'un brise-roche
- Propagation
 - Source ponctuelle
 - Propagation moyenne

point	distance [m]	Source	L_v à 7.5 m [mm/s]	v_{RMS} [mm/s]
Côté sud – école Européenne	26	Brise-roche	5	0.9
Côté nord – résidences	40	Brise-roche	5	0.4

Tableau 5.6

Discussion

Pas de dépassements.

5.7.2.5 Scénario 5 – 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

- 4) Travaux de bétonnage du local SST et de l'assise des voies
- 5) Travaux de pose de réseaux
- 7) Travaux de coffre de chaussée
- 8) Travaux de pose des voies
- 10) Travaux de montage des mâts pour la ligne aérienne de contact
- 11) Travaux de pose des finitions route et trottoirs
- 12) Travaux de plantation
- 13) Travaux de pose des multitubulaires tram

Travaux

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

Sources

- Grue
- Camions

Niveaux vibratoires

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

Discussion

Pas de dépassements.

5.7.2.6 Scénario 6 – forage des micropieux

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

Étapes correspondantes

- 9) Forage des micropieux

Travaux

- Forage des micropieux

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 micropieux	1	7.5

Tableau 5.7

Discussion

Si la distance entre les bâtiments et le forage est égal ou supérieur à 7.5 m, des dépassements ne sont pas attendus. Sinon, il y a un risque d'un dépassement momentané de la limite vibratoire A_v . Toutefois, avec un temps de travail par forage estimé d'environ 15-30 minutes, il n'y a pas de risque des dépassements de la limite A_r (le moyen sur toute la journée).

Dans le cas d'une distance inférieure à 7.5 m, on est obligé d'avertir les occupants, suivant la procédure décrite dans la norme DIN 4150-2, § 6.5.4, Stufe II.

6 CONCLUSION

Ce rapport présente les résultats de l'étude des incidences vibratoires sur l'environnement humain dans le cadre du projet du tramway, tronçon « K2 ».

La section 1 du tronçon K2 commence à la bifurcation de l'avenue John F. Kennedy pour emprunter le boulevard Konrad Adenauer jusqu'à la station Laangfur.

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, sur un endroit où le tram circule déjà. La propagation des vibrations dans le sol a été mesurée en plusieurs points (6 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.

La phase chantier du projet a également été étudiée ; les incidences vibratoires des procédés de travail susceptibles d'être mis en œuvre seront qualifiés. Il ne s'agit pas d'une étude détaillée qui prend en compte le phasage détaillé du projet, mais plutôt une vue générale.

Les calculs ont démontré que pendant les phases de terrassement superficiel (des couches de sol autres que les sols de type 6 ou 7), des dépassements ne sont généralement pas attendus, sauf dans la zone entre Pfaffenthal et l'entrée du PAP Laangfur. Toutefois, les niveaux vibratoires diminuent rapidement après quelques mètres et il est attendu que les dépassements seront donc rares. Lors de l'excavation éventuelle des sols type 6 ou 7, l'utilisation d'un brise-roche est à exclure autant que possible.

Lors de l'excavation en masse de la sous-station de traction, des dépassements ne sont pas attendus.

Pour le forage des micropieux ; si la distance entre les bâtiments et le forage est égal ou supérieur à 7.5 m, des dépassements ne sont pas attendus. Sinon, il y a un risque d'un dépassement momentané de la limite vibratoire A_u . Toutefois, avec un temps de travail par forage estimé d'environ 15-30 minutes, il n'y a pas de risque des dépassements de la limite A_r (le moyen sur toute la journée).

ANNEXE A – ÉTAT INITIAL, DISPOSITIF DE MESURE

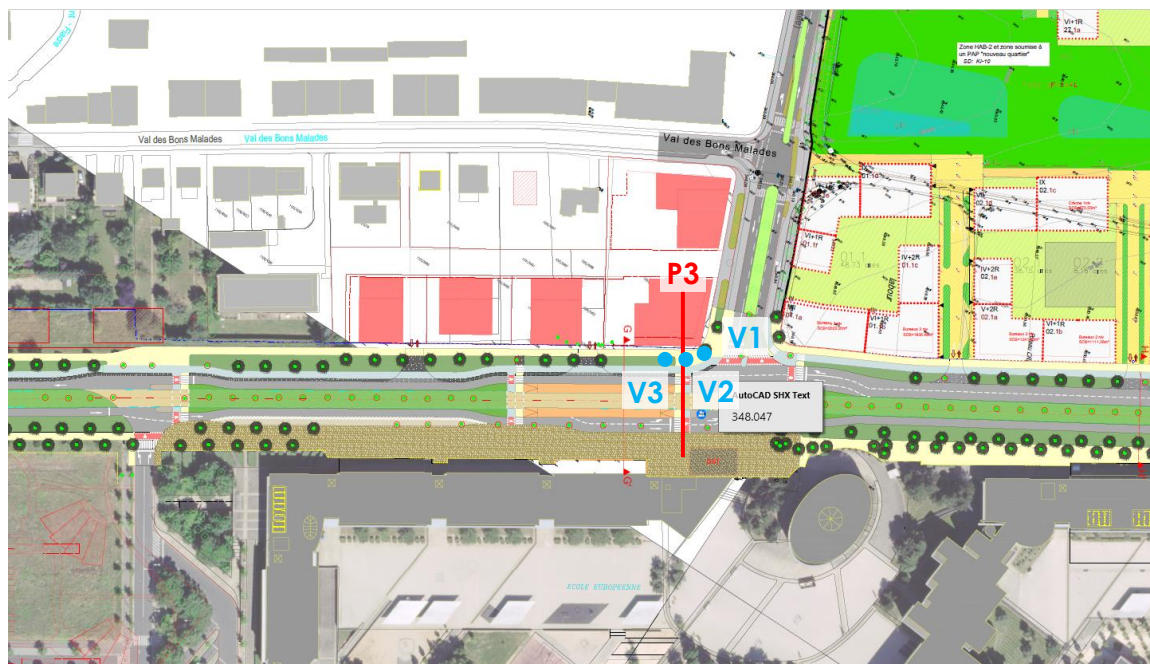
Section P1 : Boulevard Konrad Adenauer



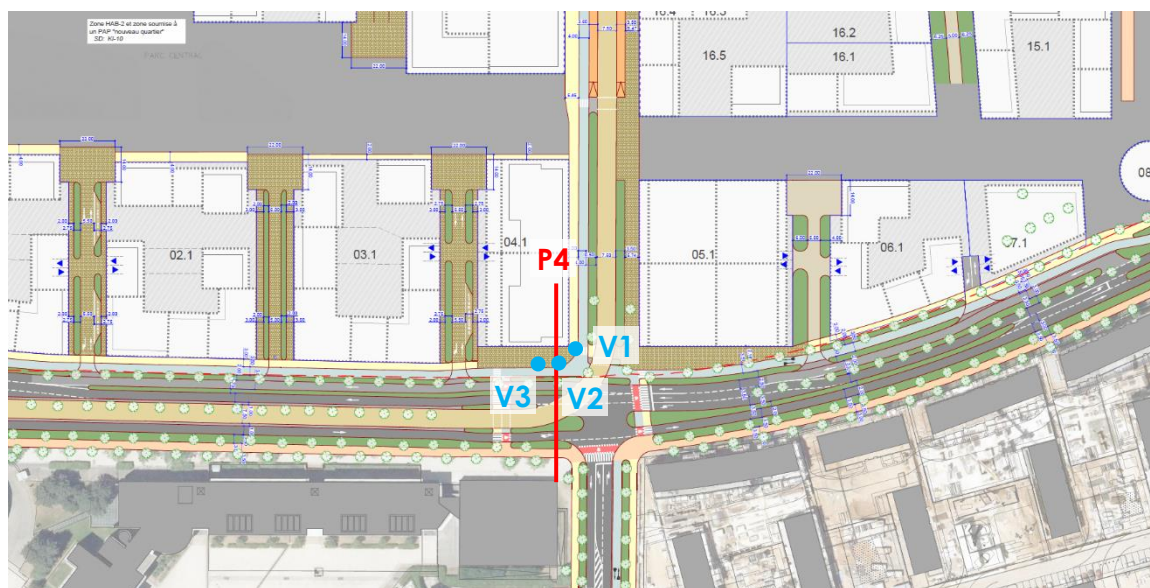
Section P2 : Boulevard Konrad Adenauer / Rue Érasme



Section P3 : Boulevard Konrad Adenauer / Boulevard du Prince Charles



Section P4 : Boulevard Konrad Adenauer / Parking





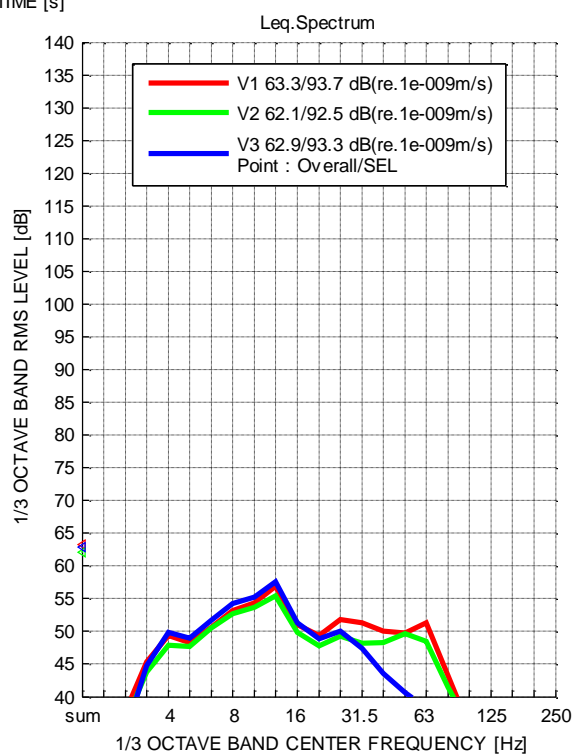
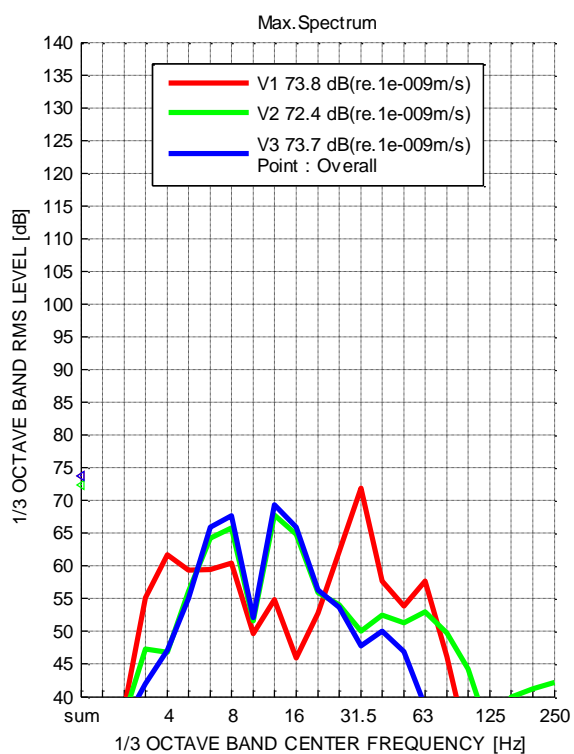
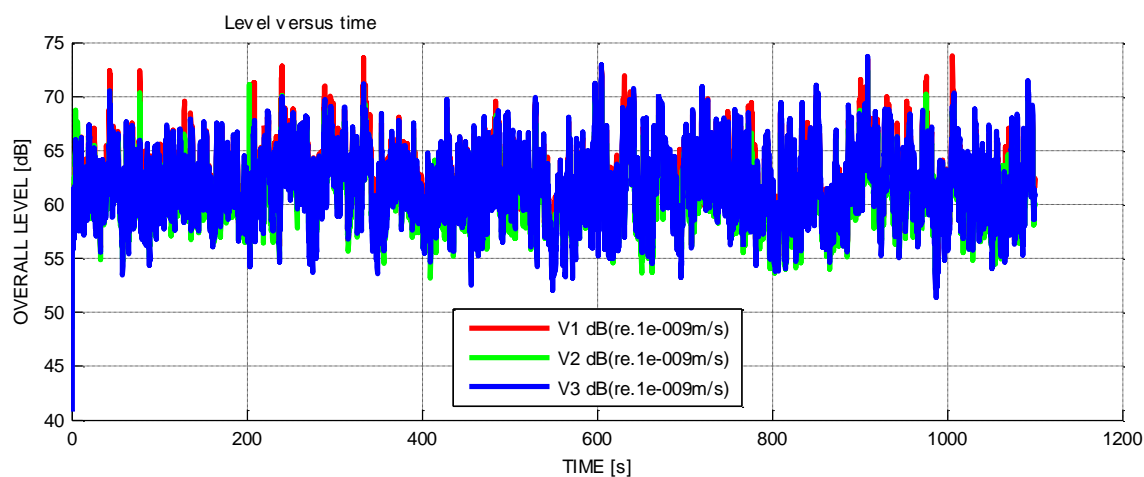
ANNEXE B – ÉTAT INITIAL, DÉTAILS DES MESURES

PROJECT: K4751 - Kirchberg K2 SECTION: P1

REC: REC001_01.mat

REMARQUE: Plusieurs bus, voitures, poids lourds

TIME: 17/01/2022 11:03:07

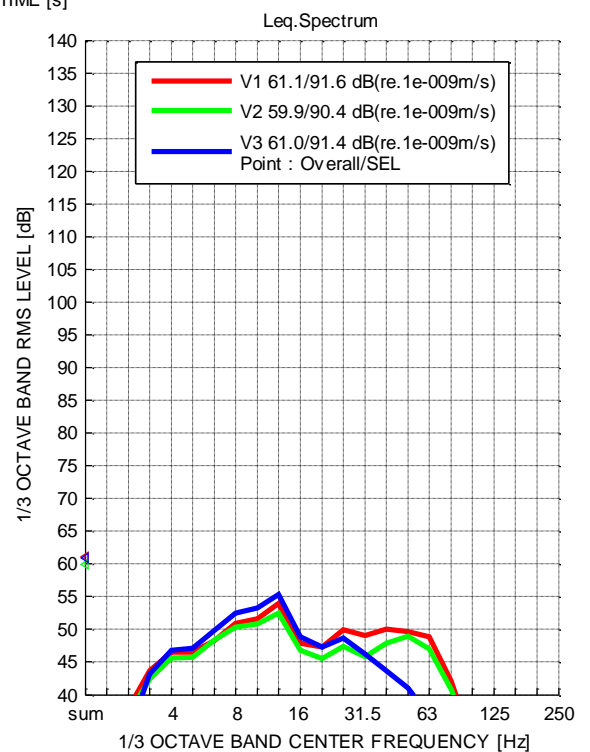
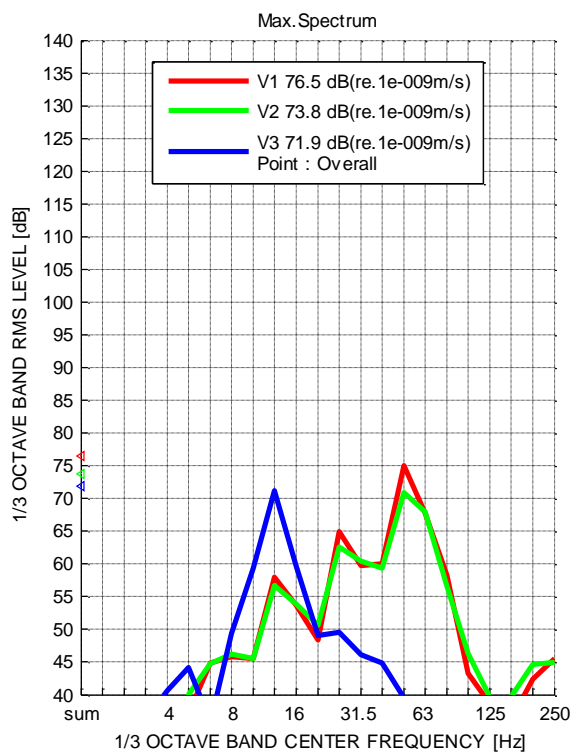
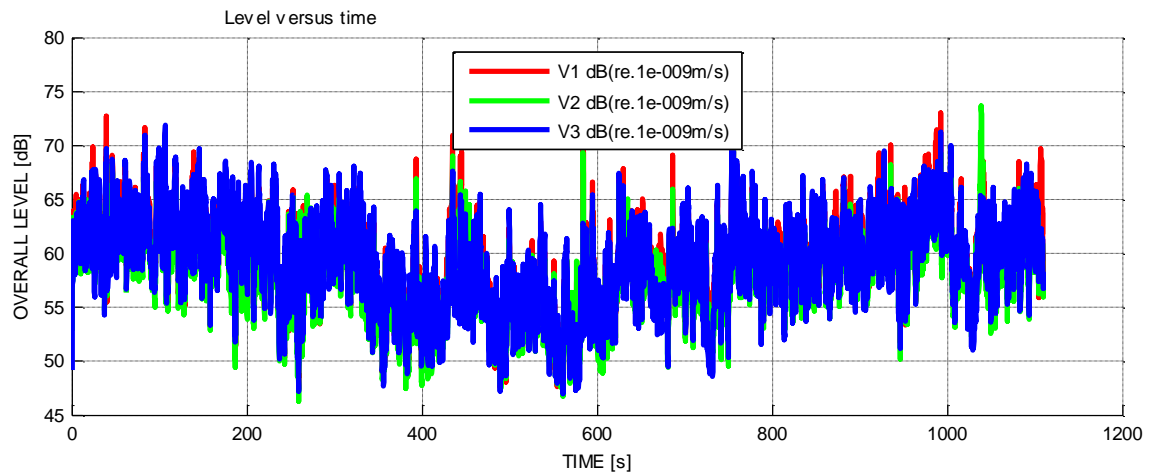


PROJECT: K4751 - Kirchberg K2 SECTION: P1

REC: REC001_02.mat

REMARQUE: Plusieurs bus, voitures, poids lourds

TIME: 17/01/2022 11:21:27

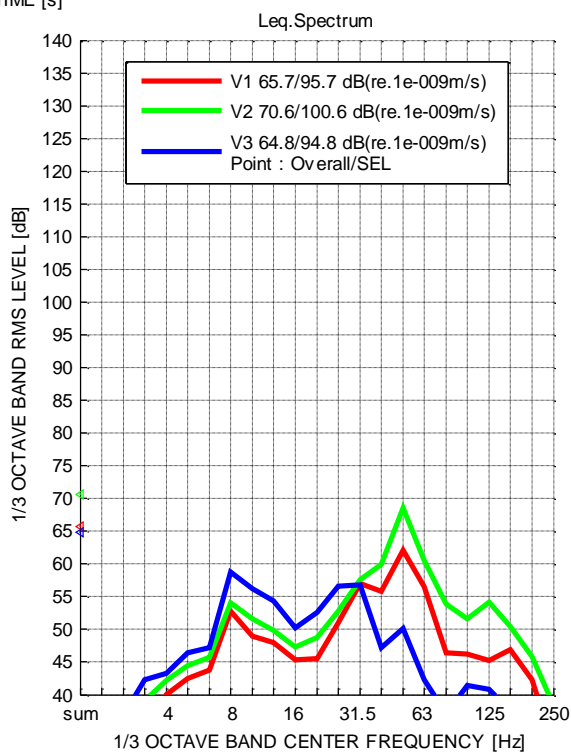
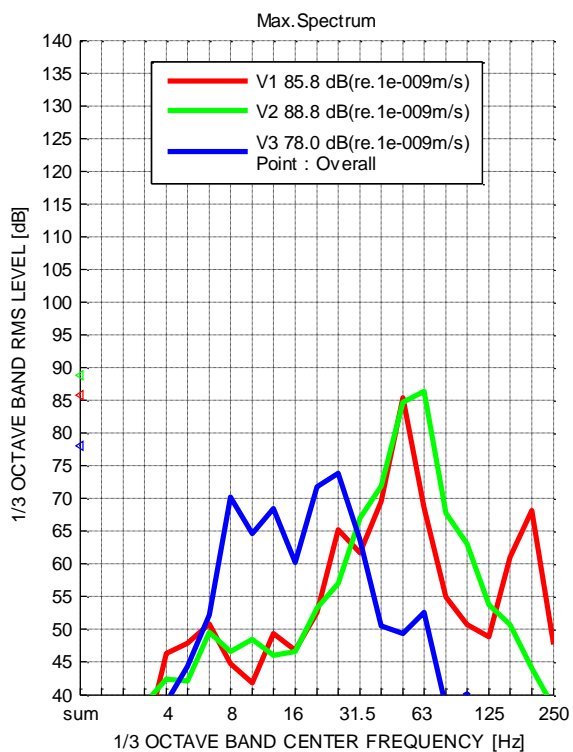
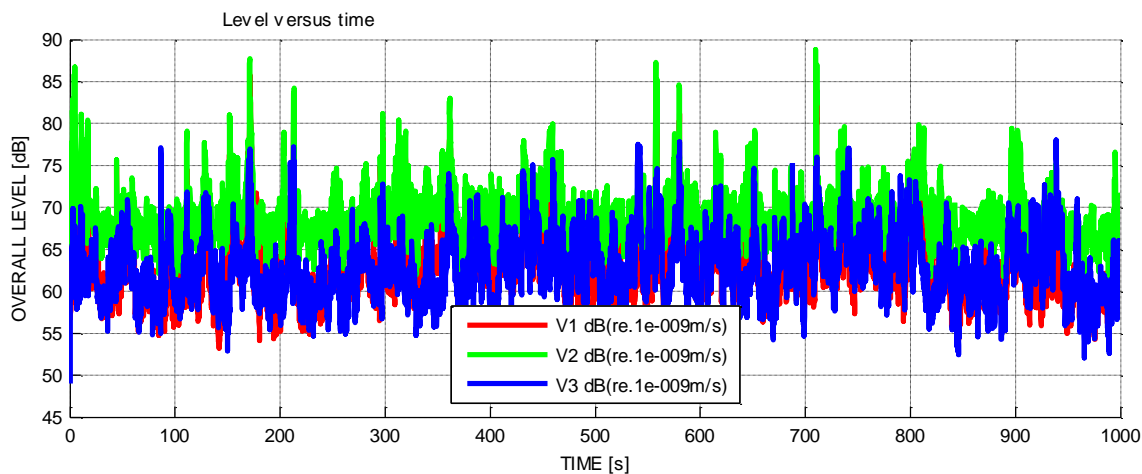


PROJECT: K4751 - Kirchberg K2 SECTION: P2

REC: REC002_01.mat

REMARQUE: Plusieurs bus, voitures, poids lourds

TIME: 17/01/2022 11:52:15



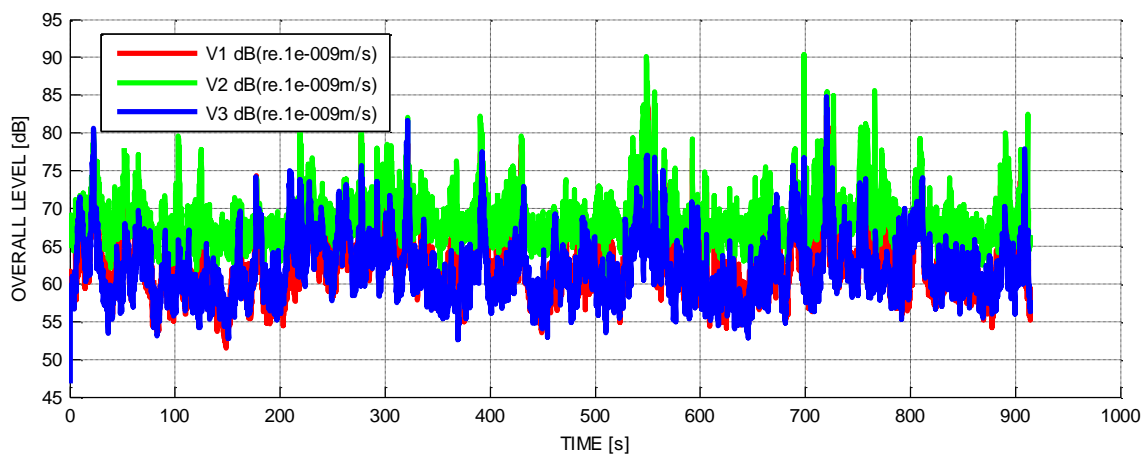
PROJECT: K4751 - Kirchberg K2 SECTION: P2

REC: REC002_02.mat

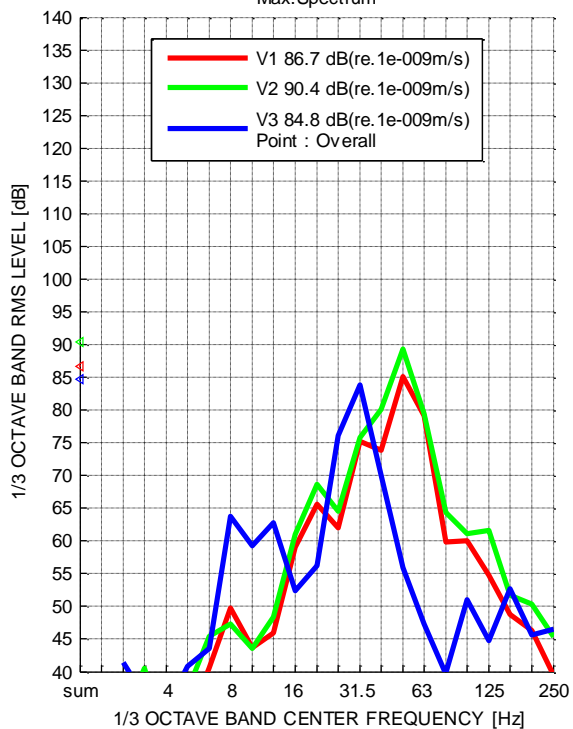
REMARQUE: Plusieurs bus, voitures, poids lourds

TIME: 17/01/2022 12:08:55

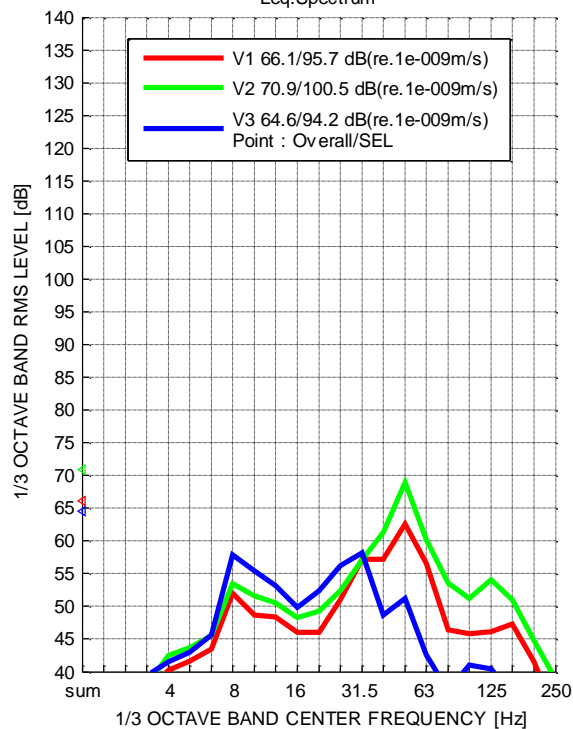
Level versus time



Max. Spectrum



Leq. Spectrum

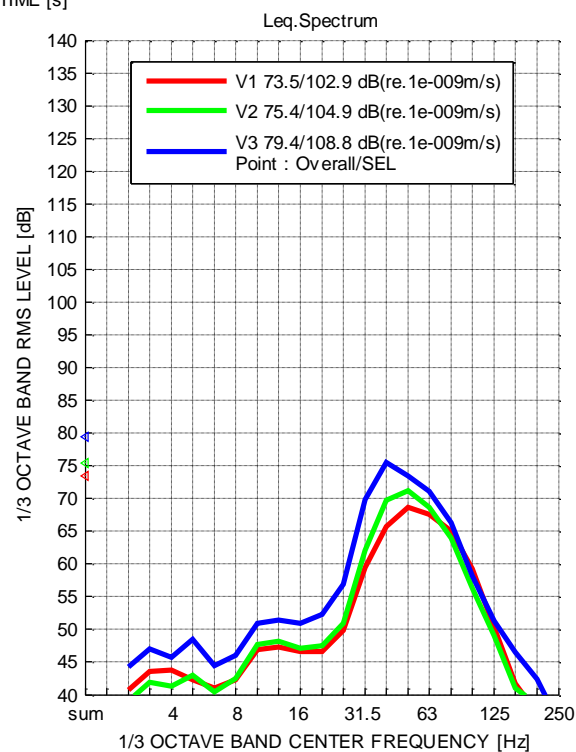
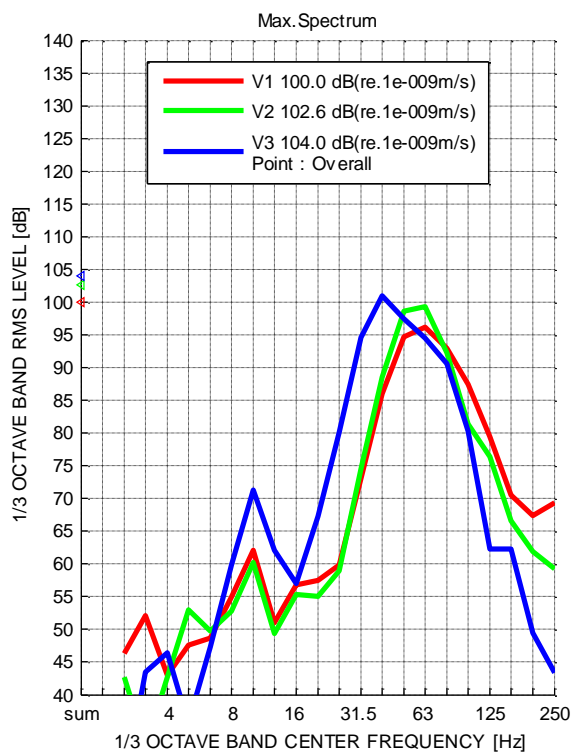
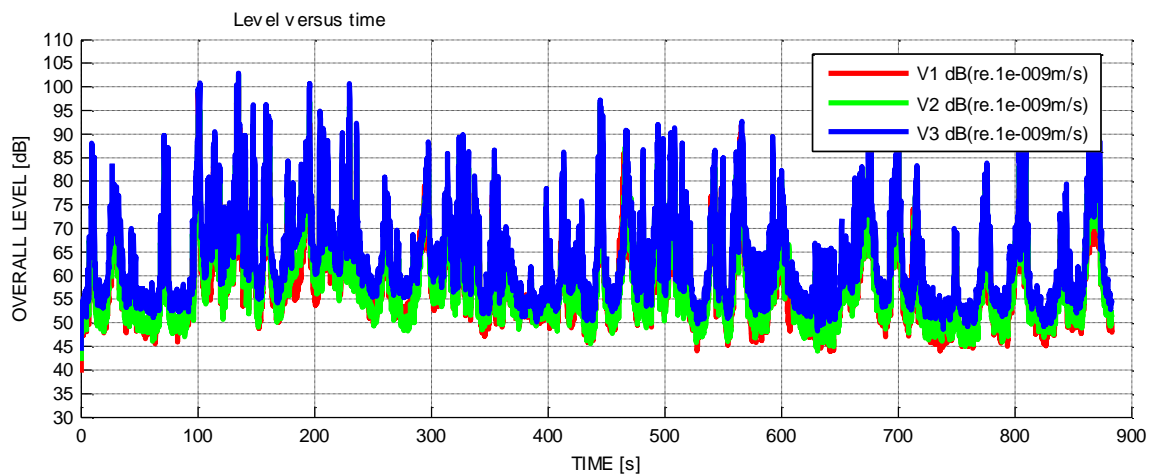


PROJECT: K4751 - Kirchberg K2 SECTION: P3

REC: REC004_01.mat

REMARQUE: Plusieurs bus, voitures, poids lourds

TIME: 17/01/2022 14:31:51

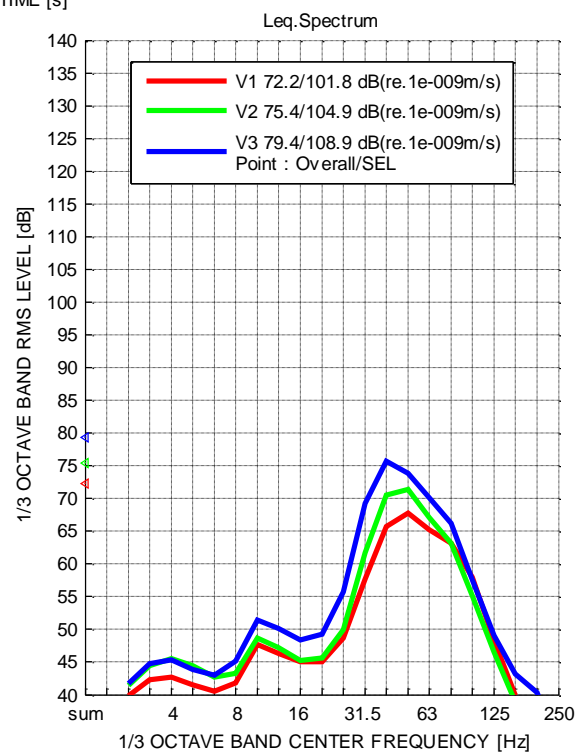
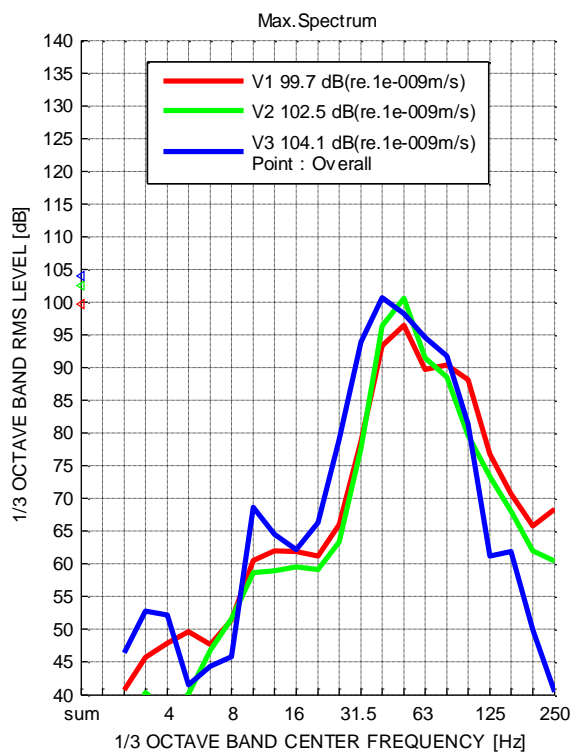
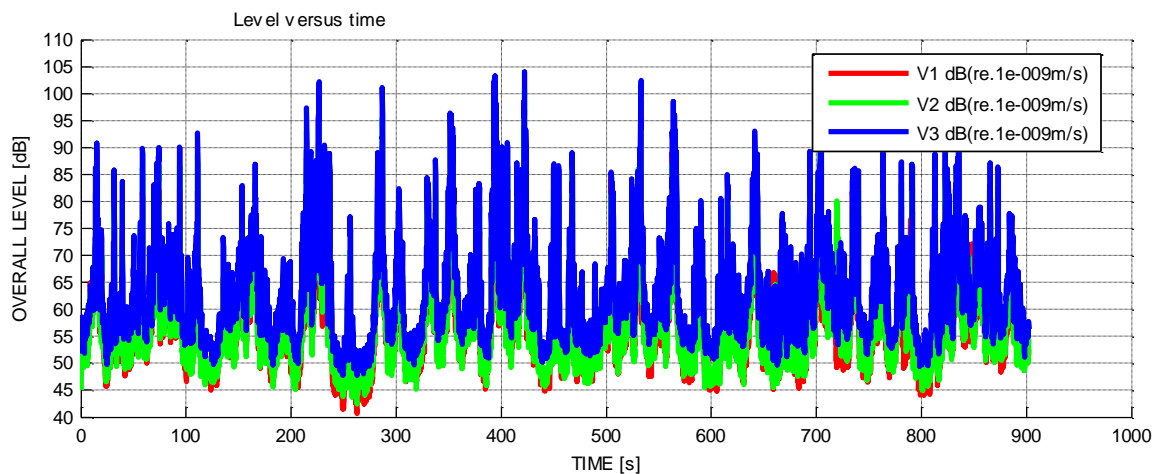


PROJECT: K4751 - Kirchberg K2 SECTION: P3

REC: REC004_02.mat

REMARQUE: Plusieurs bus, voitures, poids lourds

TIME: 17/01/2022 14:46:35

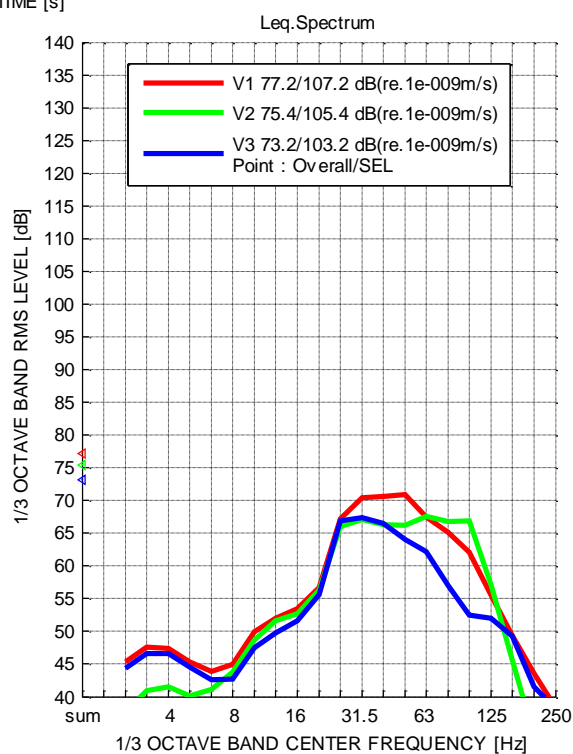
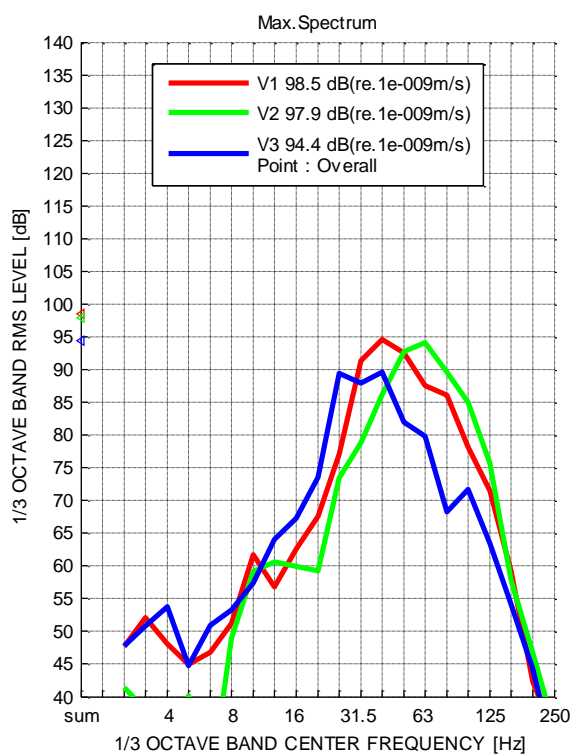
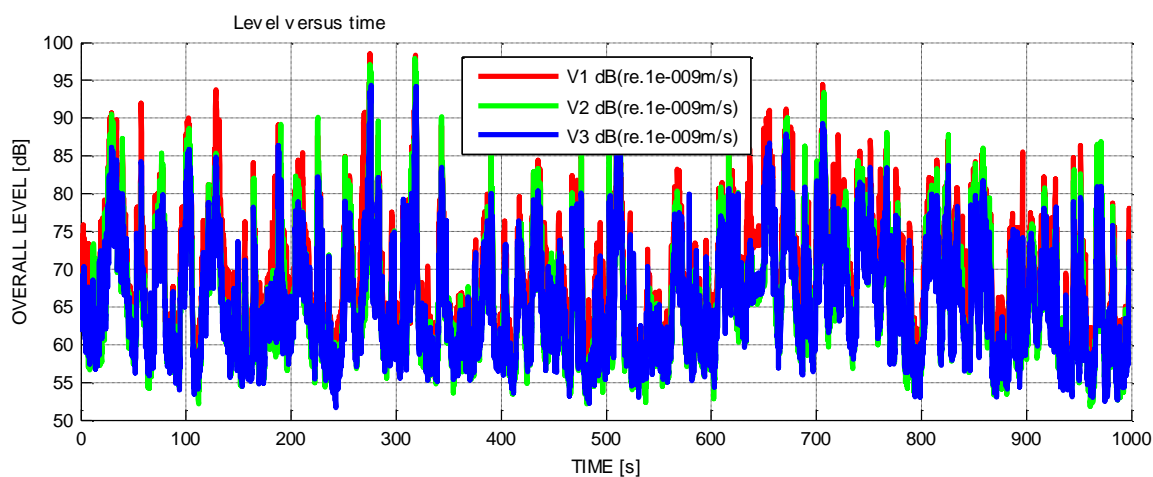


PROJECT: K4751 - Kirchberg K2 SECTION: P4

REC: REC003_01.mat

REMARQUE: Plusieurs bus, voitures, poids lourds

TIME: 17/01/2022 13:52:31

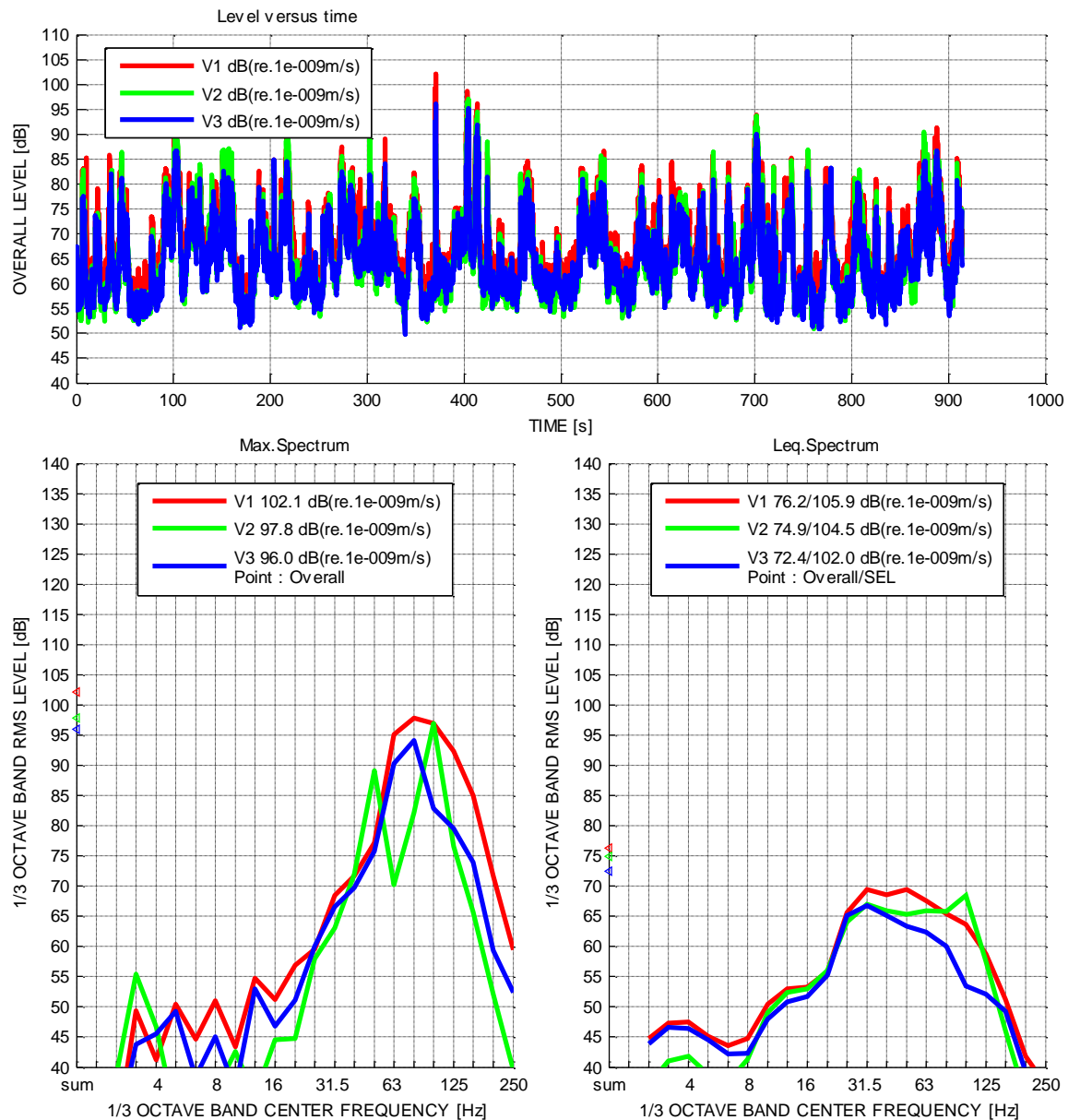


PROJECT: K4751 - Kirchberg K2 SECTION: P4

REC: REC003_02.mat

REMARQUE: Plusieurs bus, voitures, poids lourds

TIME: 17/01/2022 14:09:11

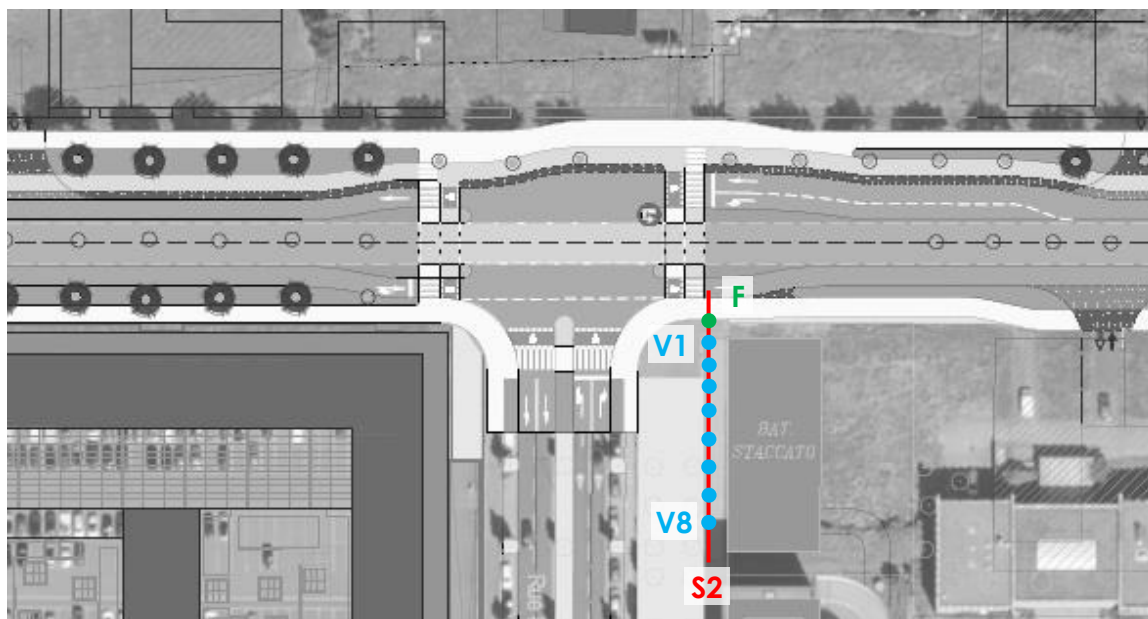


ANNEXE C – MESURES DE TRANSMISSION, DISPOSITIF DE MESURE

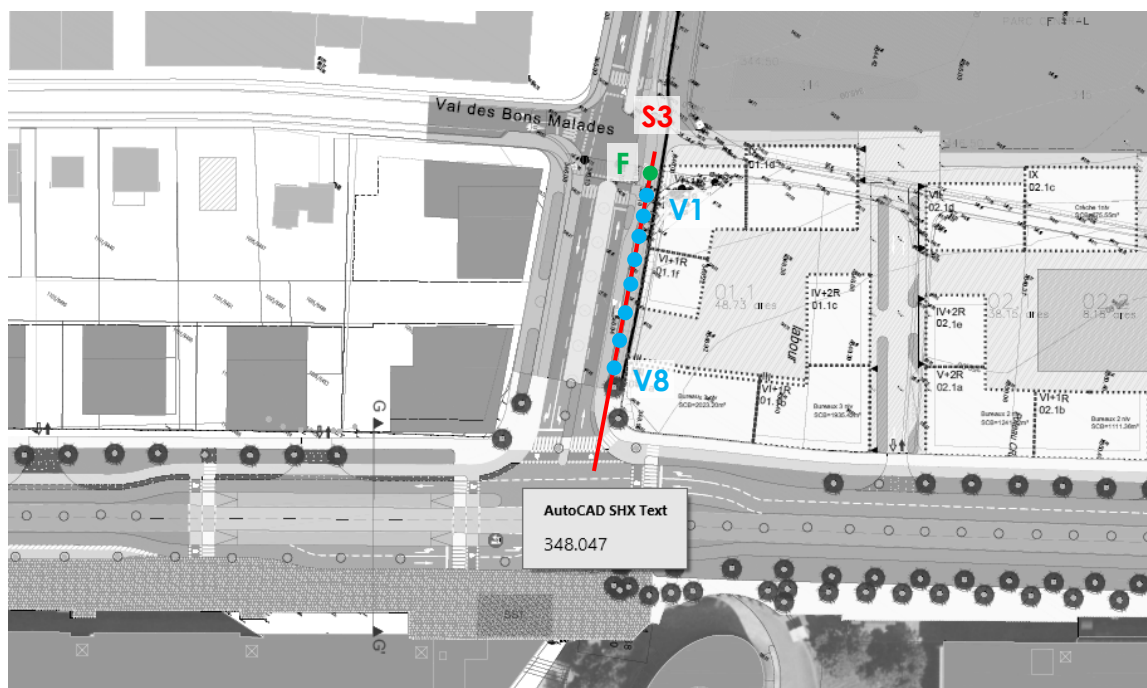
Section S1 : Boulevard Konrad Adenauer



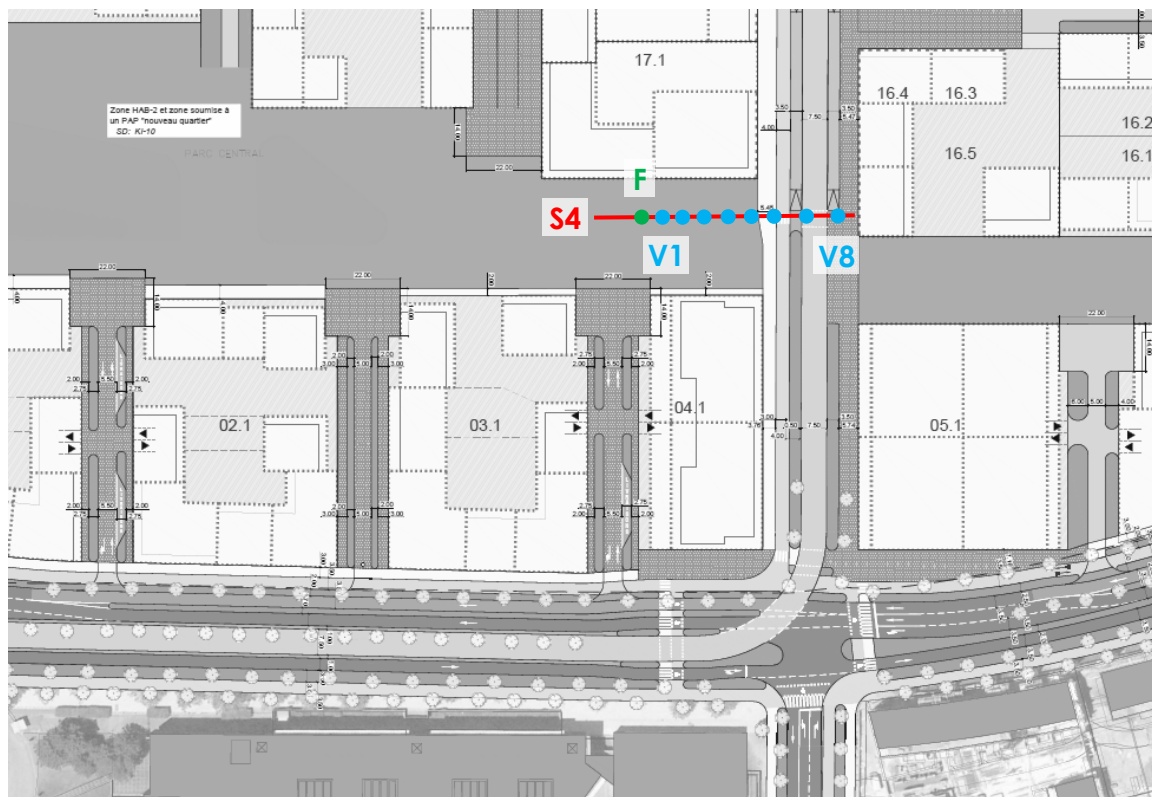
Section S2 : Boulevard Konrad Adenauer / Rue Érasme



Section S3 : Boulevard Konrad Adenauer / Boulevard du Prince Charles



Section S4 : Boulevard Konrad Adenauer / Parking



ANNEXE D – TAUX D'AFFAIBLISSEMENT VIBRATOIRE

R1=7.5m n=0.5 alpha: 0.025				R1=7.5m n=1.0 alpha: 0.025				R1=7.5m n=1.5 alpha: 0.025			
Ondes Surfaciques				Mode intermédiaire				Ondes Volumiques			
distance	réduction géométrique	absorption	total	distance	réduction géométrique	absorption	total	distance	réduction géométrique	absorption	total
4	1,369	1,091	1,495	4	1,875	1,091	2,046	4	1,3693	1,0914	1,4945
5	1,225	1,064	1,304	5	1,500	1,064	1,597	5	1,2247	1,0645	1,3037
6	1,118	1,038	1,161	6	1,250	1,038	1,298	6	1,1180	1,0382	1,1608
7	1,035	1,013	1,048	7	1,071	1,013	1,085	7	1,0351	1,0126	1,0481
7,5	1,000	1,000	1,000	7,5	1,000	1,000	1,000	7,5	1,0000	1,0000	1,0000
8	0,968	0,988	0,956	8	0,938	0,988	0,926	8	0,9077	0,9876	0,8965
9	0,913	0,963	0,879	9	0,833	0,963	0,803	9	0,7607	0,9632	0,7327
10	0,866	0,939	0,814	10	0,750	0,939	0,705	10	0,6495	0,9394	0,6102
11	0,826	0,916	0,757	11	0,682	0,916	0,625	11	0,5630	0,9162	0,5158
12	0,791	0,894	0,706	12	0,625	0,894	0,558	12	0,4941	0,8936	0,4415
13	0,760	0,872	0,662	13	0,577	0,872	0,503	13	0,4382	0,8715	0,3819
14	0,732	0,850	0,622	14	0,536	0,850	0,455	14	0,3921	0,8500	0,3333
15	0,707	0,829	0,586	15	0,500	0,829	0,415	15	0,3536	0,8290	0,2931
16	0,685	0,809	0,554	16	0,469	0,809	0,379	16	0,3209	0,8086	0,2595
17	0,664	0,789	0,524	17	0,441	0,789	0,348	17	0,2930	0,7886	0,2311
18	0,645	0,769	0,496	18	0,417	0,769	0,320	18	0,2690	0,7691	0,2069
19	0,628	0,750	0,471	19	0,395	0,750	0,296	19	0,2480	0,7501	0,1860
20	0,612	0,732	0,448	20	0,375	0,732	0,274	20	0,2296	0,7316	0,1680
21	0,598	0,714	0,426	21	0,357	0,714	0,255	21	0,2134	0,7136	0,1523
22	0,584	0,696	0,406	22	0,341	0,696	0,237	22	0,1990	0,6959	0,1385
23	0,571	0,679	0,388	23	0,326	0,679	0,221	23	0,1862	0,6788	0,1264
24	0,559	0,662	0,370	24	0,313	0,662	0,207	24	0,1747	0,6620	0,1156
25	0,548	0,646	0,354	25	0,300	0,646	0,194	25	0,1643	0,6456	0,1061
26	0,537	0,630	0,338	26	0,288	0,630	0,182	26	0,1549	0,6297	0,0976
27	0,527	0,614	0,324	27	0,278	0,614	0,171	27	0,1464	0,6142	0,0899
28	0,518	0,599	0,310	28	0,268	0,599	0,160	28	0,1386	0,5990	0,0830
29	0,509	0,584	0,297	29	0,259	0,584	0,151	29	0,1315	0,5842	0,0768
30	0,500	0,570	0,285	30	0,250	0,570	0,142	30	0,1250	0,5698	0,0712