

# **LUXTRAM**

## **Tramway de Luxembourg**

### **Tronçon Arlon**

### **Variante Mixte**

## **Etude d'impact vibratoire du**

## **tronçon Arlon**

## **Avant-Projet Détaillé (APD)**

et

## **Complément d'information au**

## **dossier EIE**

**12 mai 2025**

## TABLE DES MATIERES

<b>1.</b>	<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>5</b>
<b>2.</b>	<b>RAPPEL SUR LES NUISANCES VIBRATOIRES .....</b>	<b>6</b>
<b>3.</b>	<b>CONTEXTE REGLEMENTAIRE ET NORMATIF .....</b>	<b>7</b>
<b>4.</b>	<b>CAMPAGNE DE MESURE DE L'ETAT INITIAL.....</b>	<b>9</b>
<b>4.1</b>	<b><i>Points de mesure.....</i></b>	<b>9</b>
<b>4.2</b>	<b><i>Instrumentation.....</i></b>	<b>11</b>
4.2.1	Mesures en continu du niveau vibratoire .....	11
4.2.2	Propagation des vibrations dans le sol .....	11
<b>4.3</b>	<b><i>Résultats des mesures en continu : état vibratoire initial.....</i></b>	<b>13</b>
4.3.1	Point 1 : Café Fischer .....	13
4.3.2	Point 2 : Maternité.....	14
4.3.3	Point 3 : route d'Arlon, hôpital.....	15
4.3.4	Point 4 : 243 route d'Arlon .....	16
4.3.5	Point 5 : Route d'Arlon, stade Josy Barthel.....	17
4.3.6	Point 6 : 70 route d'Arlon, angle rue des foyers .....	18
4.3.7	Bilan .....	19
<b>4.4</b>	<b><i>Résultats de la caractérisation des sols.....</i></b>	<b>20</b>
<b>5.</b>	<b>MODELISATION DE L'IMPACT VIBRATOIRE DE LA CIRCULATION DES TRAMWAYS.....</b>	<b>22</b>
<b>5.1</b>	<b><i>Méthodologie .....</i></b>	<b>22</b>
5.1.1	Terme source .....	22
5.1.2	Terme propagatif.....	22
5.1.3	Terme immission.....	22
<b>5.2</b>	<b><i>Bâtiments analysés .....</i></b>	<b>23</b>
<b>5.3</b>	<b><i>Résultats .....</i></b>	<b>26</b>
5.3.1	Zone tranchée couverte .....	27
5.3.2	Zone hôpital .....	29
5.3.3	Zone à proximité du stade Josy Barthel.....	37
<b>6.</b>	<b>CONCLUSION.....</b>	<b>39</b>

<b>7.</b>	<b>COMPLÉMENT – ETUDE DES INCIDENCES ACOUSTIQUES DU PROJET .....</b>	<b>42</b>
<b>7.1</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>42</b>
<b>7.2</b>	<b>Méthodologie générale.....</b>	<b>42</b>
<b>7.3</b>	<b>Données .....</b>	<b>42</b>
<b>7.4</b>	<b>Méthode de calcul utilisée .....</b>	<b>43</b>
<b>7.5</b>	<b>Détermination des incidences .....</b>	<b>43</b>
7.5.1	Affectation des bâtiments.....	44
7.5.2	Incidences.....	47
<b>7.6</b>	<b>Présentation des résultats .....</b>	<b>48</b>
<b>7.7</b>	<b>Analyse des résultats .....</b>	<b>48</b>
<b>7.8</b>	<b>Conclusions et recommandations .....</b>	<b>51</b>
<b>8.</b>	<b>ANNEXES .....</b>	<b>52</b>
<b>8.1</b>	<b>Liste du matériel de mesure .....</b>	<b>53</b>
<b>8.2</b>	<b>Terme source : Données d'entrée pour le calcul .....</b>	<b>54</b>
<b>8.3</b>	<b>Terme propagatif : Transfert sol.....</b>	<b>57</b>

### LISTE DES FIGURES

Figure 1 :	Localisation de la partie du tronçon d'Arlon concernée par l'étude .....	5
Figure 2 :	Génération et propagation des vibrations au passage d'un matériel roulant.....	6
Figure 3 :	Critères vibratoires selon la DIN 4150-2 .....	7
Figure 4 :	Critère bruit solidien VDI 2719 .....	8
Figure 5 :	Points de mesure du niveau vibratoire en continu .....	9
Figure 6 :	Zone de mesure des propagations de vibration dans le sol .....	10
Figure 7 :	Exemple de mesures vibratoires .....	11
Figure 8 :	Exemple de mesure de transfert vibratoire avec une masse d'impact .....	12
Figure 9 :	Caractérisation des sols des zones hôpital et stade : mobilités de transfert .....	20
Figure 10 :	Taux de décroissance mesuré comparé aux taux de décroissance théoriques .....	21
Figure 11 :	Identification des bâtiments à analyser .....	23
Figure 12 :	Zone en tranchée couverte étudiée .....	27
Figure 13 :	Base de données de fonctions de transfert plancher, résonances alignées avec le mode de dalle flottante entourées en rouge .....	28
Figure 14 :	Localisation des zones dans le secteur hôpital .....	29
Figure 15 :	Identification des bâtiments critiques rue Federspiel.....	31
Figure 16 :	Bâtiments proches de la voie pour le secteur rue Federspiel.....	31
Figure 17 :	Comparaison des niveaux vibratoires dans l'hôpital aux critères VC pour équipements sensibles, route-d'Arlon, vitesse de circulation de 50km/h .....	34
Figure 18 :	Comparaison des niveaux vibratoires dans l'hôpital aux critères VC pour équipements sensibles, route-d'Arlon, vitesse de circulation de 70km/h .....	34
Figure 19 :	Distance entre l'hôpital et la future voie de tram, route d'Arlon .....	35
Figure 20 :	Zone critique du bâtiment d'hôpital rue Federspiel pour comparaison aux critères équipements sensibles.....	36
Figure 21 :	Comparaison des niveaux vibratoires dans l'hôpital aux critères VC pour équipements sensibles, rue Federspiel, vitesse de circulation de 30km/h .....	36
Figure 22 :	Secteur stade.....	37

Figure 23 : Préconisation des poses de voie tranchée couverte, valable pour les 2 niveaux de critères VDI, vitesse de circulation de 50km/h.....	40
Figure 24 : Préconisations des poses de voie zone Ouest du tronçon, secteur hôpital .....	41
Figure 25 : Préconisations des poses de voie zone Est du tronçon, secteur stade.....	41
Figure 26 : Vue 3D de la maquette en situation actuelle : zone du CHL .....	42
Figure 27 : Vue 3D de la maquette en situation future : zone du CHL .....	43
Figure 28 : Localisation des bâtiments – Situation actuelle.....	44
Figure 29 : Localisation des bâtiments – Situation future .....	45
Figure 30 : Carte de bruit stratégique – Routes d’agglomération 2021 – $L_{DEN}$ en dB(A).....	46
Figure 31 : Carte de bruit stratégique – Routes d’agglomération 2021 – $L_{night}$ en dB(A) <sup>14</sup> .....	46
Figure 32 : Détermination des incidences du tram : organigramme décisionnel .....	47
Figure 33 : Gain par insertion, par rapport à la pose standard, des poses de voies considérées pour les simulations.....	56
Figure 34 : Caractéristiques de la tranchée couverte.....	57
Figure 35 : Mobilité de transfert linéique simulation Mefissto, zone tranchée couverte.....	58
Figure 36 : Coupe 2D de la modélisation Mefissto, configuration tranchée couverte avec les paramètres des couches de sol.....	58
Figure 37 : Coupe 2D de la modélisation Mefissto, configuration surface.....	59

### LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Liste des points de mesure du niveau vibratoire en continu.....	9
Tableau 2 : Bilan de l’état vibratoire initial.....	19
Tableau 3 : Caractéristiques des configurations de bâtiments à analyser .....	25
Tableau 4 : Critères de validation retenus.....	26
Tableau 5 : Résultats de la zone tranchée couverte, vitesse de circulation de 50km/h .....	27
Tableau 6 : Résultats de la zone tranchée couverte pour la configuration critique (configuration 5), vitesse de circulation de 70km/h.....	28
Tableau 7 : Résultats de la zone sortie de tranchée couverte, vitesse de circulation de 50km/h.....	29
Tableau 8 : Résultats de la zone sortie de tranchée couverte, vitesse de circulation de 70km/h.....	30
Tableau 9 : Résultats de la zone hôpital, secteur rue Federspiel.....	30
Tableau 10 : Résultats hôpital rue Federspiel, hypothèse de circulation à 15km/h en approche de l’arrêt .....	32
Tableau 11 : Critères VC pour les équipements sensibles.....	33
Tableau 12 : Résultats de la zone stade .....	37
Tableau 13 : Objectifs pour l’exploitation suivant la norme 16. Blm Sch V .....	43
Tableau 14 : Description des points d’immission : affectations, types, exposition et zones considérées .....	45
Tableau 15 : Niveaux spécifiquement induits par les trams .....	48
Tableau 16 : Niveaux spécifiques induits par la route .....	49
Tableau 17 : Niveaux spécifiques induits par les trams + route .....	49
Tableau 18 : Résultats synthétiques des incidences de l’exploitation du projet.....	50
Tableau 19 : Résultats synthétiques des incidences de l’exploitation du projet avec un tram de 56 m de long .....	51
Tableau 20 : Liste du matériel utilisé.....	53



## 1. INTRODUCTION

Dans le cadre de la réalisation du « tronçon Arlon » du projet de Tramway de la Ville de Luxembourg, une étude APS/APD d'impact liée aux bruits et vibrations d'origine solidienne (transfert par le sol) a été réalisée. Cette étude porte à la fois sur la phase exploitation de la voie et sur la phase travaux pour la partie localisée entre le stade et l'hôpital.

L'emplacement de cette partie du futur tronçon de voie de tramway est présenté sur la Figure 1.



Figure 1 : Localisation de la partie du tronçon d'Arlon concernée par l'étude

L'étude en phase exploitation poursuit deux objectifs :

1. S'assurer que l'impact vibratoire de la circulation respecte les seuils vibratoires et de bruit solidien par rapport aux valeurs cibles.
2. Préconiser le type de pose de voie en fonction des seuils à respecter.

Au vu des contraintes de planning imposées par le projet, cette étude se déroule en 2 phases successives :

- EIE : Etudes et Evaluations des Incidences sur l'Environnement,
- APS/APD : Avant-Projet Sommaire/Avant-Projet Détaillé.

Le rapport « DM-jpc-LU0407-RP2024-0146\_BIS.pdf » déjà livré représente l'EIE.

Le présent rapport traite de la partie exploitation pour la phase APD.

Ce rapport présente les deux aspects de la démarche :

1. Mesures de caractérisation de l'état vibratoire initial avant implantation du tronçon d'Arlon
2. Modélisation et calcul de l'impact vibratoire de la circulation des trams sur le futur tronçon d'Arlon

L'étude concernant la phase travaux fera l'objet d'un autre rapport.

## 2. RAPPEL SUR LES NUISANCES VIBRATOIRES

Les riverains et les infrastructures (par exemple hôpitaux, laboratoires, bureaux, etc.) à proximité de voies et sites ferroviaires sont exposés à des niveaux vibratoires et de bruit solidien qu'il faut contrôler pour limiter leurs effets. La Figure 2 illustre les phénomènes physiques liés à ces nuisances.

Concernant les nuisances vibratoires, l'origine de la source principale et dominante se situe au niveau de l'interaction entre les surfaces de roulement de la roue et du rail qui génère des efforts dynamiques et des vibrations. Ces vibrations sont ensuite transmises de proche en proche dans le matériel roulant et dans le sol ou la structure qui supporte la voie. Ces vibrations donnent lieu d'une part à un bruit aérien (en vert dans la Figure 2, non considéré dans le présent document) qui se propage dans l'air jusqu'aux bâtiments, et d'autre part à un bruit solidien dans les bâtiments (en bleu dans la Figure 2) issu des vibrations qui se propagent dans le sol et entraînent le rayonnement de la structure du bâtiment (en rouge dans la Figure 2).

Le bruit perçu par l'être humain constitue une gêne acoustique. Les vibrations perçues par l'être humain, constituent une gêne vibratoire.

Les aspects vibration et bruit solidien dans les bâtiments liés aux mouvements des trams sur le tronçon d'Arlon sont traités dans la partie concernant la phase exploitation de la présente étude.

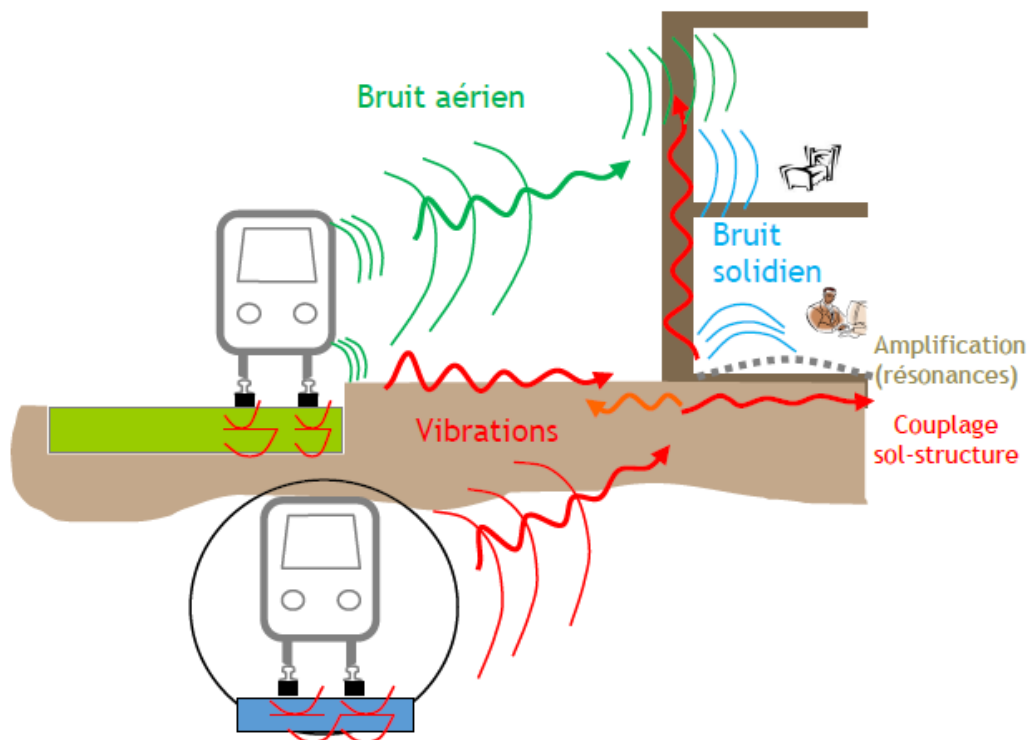


Figure 2 : Génération et propagation des vibrations au passage d'un matériel roulant

La réalisation des opérations de travaux lors de la construction du tronçon représente également une source de vibrations et donc de nuisances pour les riverains et les infrastructures. Cet impact sera traité dans un autre rapport.

### 3. CONTEXTE REGLEMENTAIRE ET NORMATIF

Dans le cadre de cette étude, 2 normes sont utilisées pour l'établissement des critères :

- La DIN 4150 -2 (1999) pour les niveaux vibratoires,
- La VDI 2719 (1987) pour les niveaux acoustiques.

#### Critères vibratoires : norme DIN 4150-2

La norme DIN-4150 repose sur des mesures de vibrations dans les bâtiments. Elle définit des critères à respecter qui sont calculés à partir de la vitesse vibratoire pondérée.

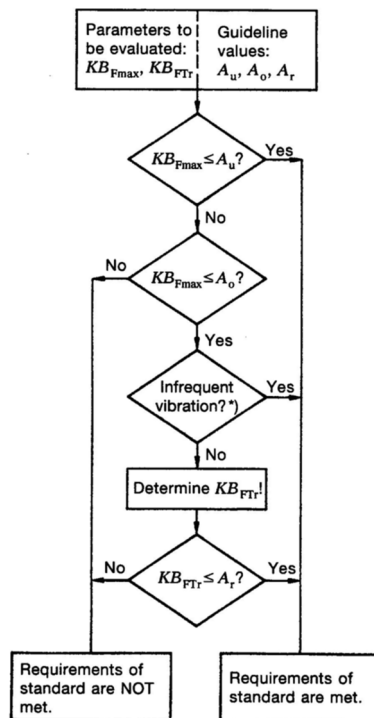
Les équations suivantes sont appliquées aux spectres vibratoires  $v(f)$  calculés.

Vitesses pondérées de la norme :	Indicateurs de la norme :
$KB_F(f) = \frac{v(f)}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_0}{f}\right)^2}}$	$KB_{FTm} = \sqrt{\sum_{n=Zug1}^{Zug.N} KB_{FTm}^2}$
$KB_{FTm} = \sqrt{\sum_{f=1Hz}^{80Hz} KB_F^2(f)}$	$KB_{Fmax} = c_m \cdot KB_{FTm}$

Avec :

- $f_0=5.6\text{Hz}$
- $C_m=1.5$  pour les planchers bétons, 1.7 pour les planchers bois

Les indicateurs  $KB_{Fmax}$  et  $KB_{FTm}$  ainsi calculés sont comparés aux limites de la norme, qui dépendent du type de bâtiment analysé (logement, bureau, zone commerciale, ...).



Line	Location of building	Day			Night		
		$A_u$	$A_o$	$A_r$	$A_u$	$A_o$	$A_r$
1	Buildings in purely industrial areas, where the only dwellings are intended for plant owners or managers, superintendents, stand-by service personnel, etc. (comparable with 'Industriegebiet' as defined in article 9 of the Baunutzungsverordnung")	0,4	6	0,2	0,3	0,6	0,15
2	Buildings in predominantly commercial areas (comparable with 'Gewerbegebiet' as defined in article 8 of the Baunutzungsverordnung")	0,3	6	0,15	0,2	0,4	0,1
3	Buildings in areas which are neither predominantly commercial nor predominantly residential (comparable with 'Kerngebiet' as defined in article 7, 'Mischgebiet' as in article 6 or 'Dorfgebiet' as in article 5 of the Baunutzungsverordnung")	0,2	5	0,1	0,15	0,3	0,07
4	Buildings in areas which are predominantly or purely residential (comparable with 'reines Wohngebiet' as defined in article 3, 'allgemeines Wohngebiet' as in article 4 or 'Kleinsiedlungsgebiet' as in article 2 of the Baunutzungsverordnung")	0,15	3	0,07	0,1	0,2	0,05
5	Buildings in specially protected areas (such as hospitals) or in health resorts	0,1	3	0,05	0,1	0,15	0,05

Figure 3 : Critères vibratoires selon la DIN 4150-2

### Critère acoustique : VDI 2719 (1987)

Ce document définit des critères de bruit solidien à l'intérieur des bâtiments.  
Les limites dépendent également de l'usage du bâtiment.

La VDI donne deux indicateurs de bruit : le niveau de bruit moyenné sur tous les passages de tramway et le niveau de bruit maximal lors d'un passage. Ici, seul le 2ème critère est retenu car il est le plus dimensionnant.

Tabelle 6 enthält Anhaltswerte für anzustrebende Innenschallpegel  $L_i$ .

Tabelle 6. Anhaltswerte für Innenschallpegel  $L_i$  (gültig nur für von außen in Aufenthaltsräume eindringenden Schall) [9; 19], die nicht überschritten werden sollten

Raumart	A-bewertete	
	Mittelungspegel $L_m$ *) dB	mittlere Maximalpegel $L_{max}$ dB
<b>1 Schlafräume nachts**)</b>		
1.1 in reinen und allgemeinen Wohngebieten, Krankenhaus- und Kurgebieten	25 bis 30	35 bis 40
1.2 in allen übrigen Gebieten	30 bis 35	40 bis 45
<b>2 Wohnräume tagsüber</b>		
2.1 in reinen und allgemeinen Wohngebieten, Krankenhaus- und Kurgebieten	30 bis 35	40 bis 45
2.2 in allen übrigen Gebieten	35 bis 40	45 bis 50
<b>3 Kommunikations- und Arbeitsräume tagsüber</b>		
3.1 Unterrichtsräume, ruhebedürftige Einzelbüros, wissenschaftliche Arbeitsräume, Bibliotheken, Konferenz- und Vortragsräume, Arztpraxen, Operationsräume, Kirchen, Aulen	30 bis 40	40 bis 50
3.2 Büros für mehrere Personen	35 bis 45	45 bis 55
3.3 Großraumbüros, Gaststätten, Schalterräume, Läden	40 bis 50	50 bis 60

\*) Für Flugverkehrsgläusche ist vom äquivalenten Dauerschallpegel gemäß Fluglärmsgesetz bzw. von DIN 45643 auszugehen.

**Figure 4 : Critère bruit solidien VDI 2719**

On retient :

- 35 à 40 dB(A) pour les habitations et l'hôpital (critère chambre nuit),
- 40 à 50 dB(A) pour les bureaux.



#### 4. CAMPAGNE DE MESURE DE L'ETAT INITIAL

Pour cette campagne de mesure, deux types de mesures sont effectués sur site :

- Une mesure du niveau vibratoire sur 30 à 60 minutes, permettant de caractériser le niveau vibratoire actuel de la zone.
- Une mesure de transfert vibratoire du sol. Cette mesure, associée au rapport géotechnique (Fondasol, «Mission G2 AVP, PR.LUGT.21.210– 001 – indice 0» 2021), permet de modéliser le comportement du sol dans la zone afin de réaliser les calculs d'impact vibratoire

##### 4.1 Points de mesure

6 points de mesures ont été retenus pour la mesure en continu du niveau vibratoire, sur une durée de 30 à 60 minutes.

#	Localisation	Description	Accès
1	Café Fischer	Résidentiel	Voie publique
2	Maternité Grande Duchesse Charlotte, 1 rue Federspiel	Hôpital	Voie publique
3	271 route d'Arlon	Commercial / futur hôpital	Voie publique
4	243 route d'Arlon	Résidentiel	Voie publique
5	Route d'Arlon, stade Josy Barthel	Stade	Voie publique
6	70 route d'Arlon, angle rue des foyers	Résidentiel	Voie publique

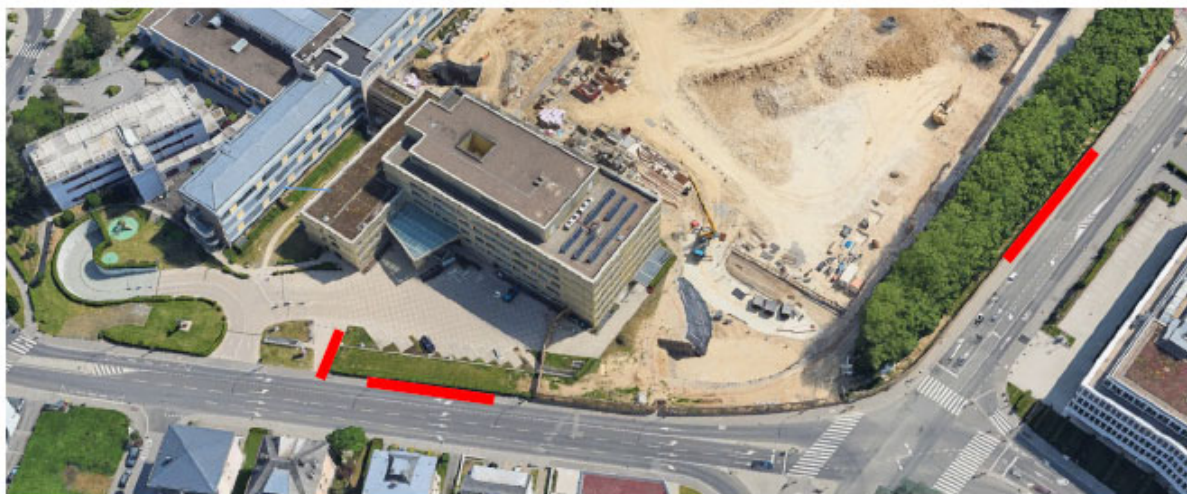
Tableau 1 : Liste des points de mesure du niveau vibratoire en continu

Ces points sont affichés en Figure 5.



Figure 5 : Points de mesure du niveau vibratoire en continu

Pour la caractérisation du sol, les transferts vibratoires ont été réalisés dans la zone de l'hôpital à l'Ouest du tracé, et dans la zone du stade à l'Est du tracé.



Zone hôpital



Zone stade

Figure 6 : Zone de mesure des propagations de vibration dans le sol



## 4.2 Instrumentation

### 4.2.1 Mesures en continu du niveau vibratoire

Afin de caractériser l'état vibratoire avant les travaux, les vibrations sont mesurées pendant 30 minutes à 1 heure sur 6 points différents (points sur la Figure 5). Chaque point est instrumenté avec un accéléromètre, comme montré à titre d'exemple sur la Figure 7.



Figure 7 : Exemple de mesures vibratoires

Ces mesures permettent d'établir l'état vibratoire dans la zone du tronçon d'Arlon. Les sources de vibrations, à priori principalement le trafic routier, seront enregistrées.

### 4.2.2 Propagation des vibrations dans le sol

Le comportement du sol est caractérisé par des mesures de transfert vibratoire du sol. Ces informations permettent de calibrer la simulation numérique. Les mesures sont réalisées dans 2 zones :

- La zone de l'hôpital,
- La zone du stade.

Pour la partie prévue en tranchée couverte entre ces 2 zones, il n'est pas possible de réaliser des mesures de transfert vibratoire avant les travaux et les mesures de comportement du sol en surface n'ont donc pas d'intérêt sur cette section.

Pour réaliser cette mesure, chaque zone est instrumentée en accéléromètre à différentes distances et la zone est sollicitée à la masse d'impact : l'objectif de la mesure est de quantifier la réponse des accéléromètres à différentes distances de l'impact généré à l'aide de la masse.



Figure 8 : Exemple de mesure de transfert vibratoire avec une masse d'impact

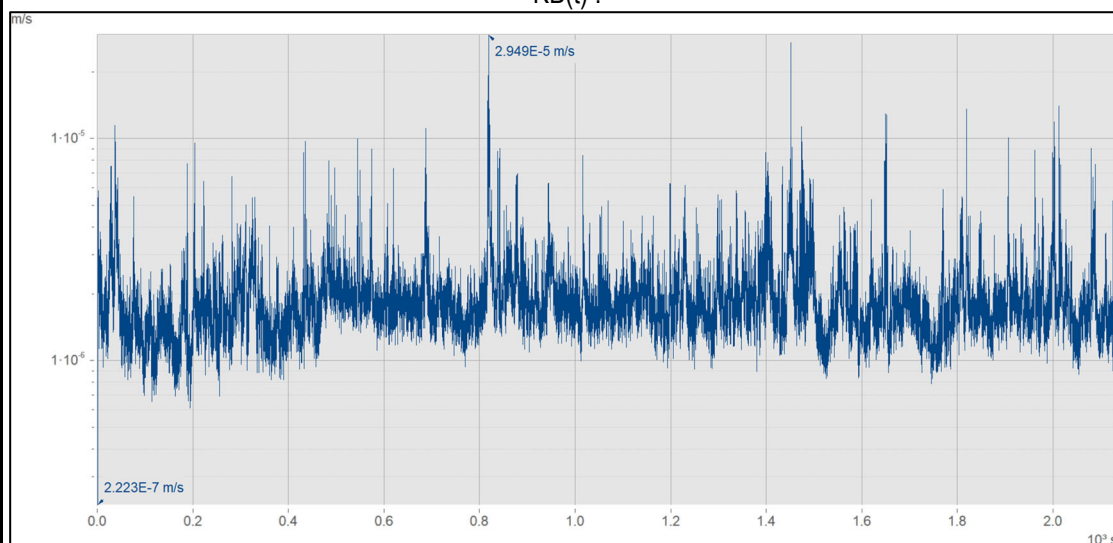


### 4.3 Résultats des mesures en continu : état vibratoire initial

#### 4.3.1 Point 1 : Café Fischer



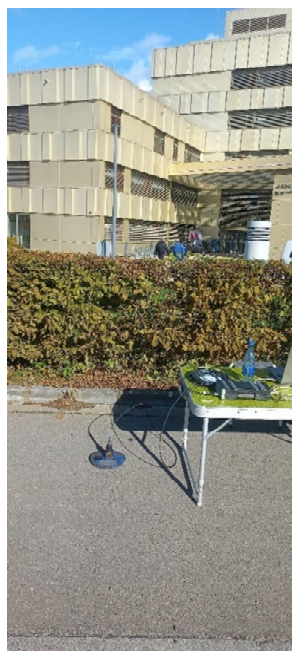
KB(t) :



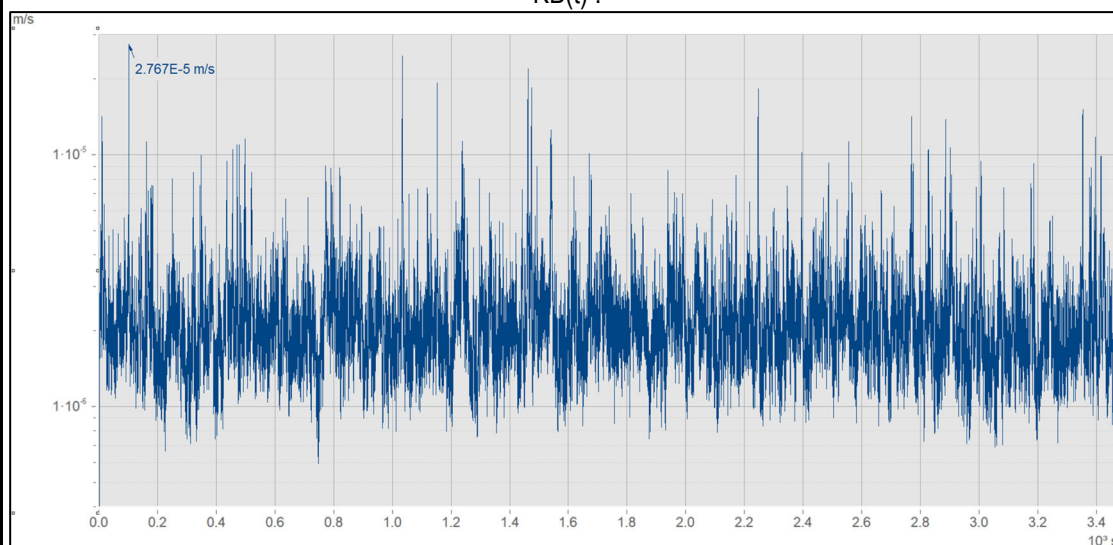
Commentaires sur les mesures de l'existant :

- Durée des mesures : 30 minutes
- KBFTM=0.0078mm/s
- KBFmax=0.029mm/s
- Niveaux vibratoires mesurés faibles (KBFmax < 0.1 mm/s le seuil de sensibilité)

#### 4.3.2 Point 2 : Maternité



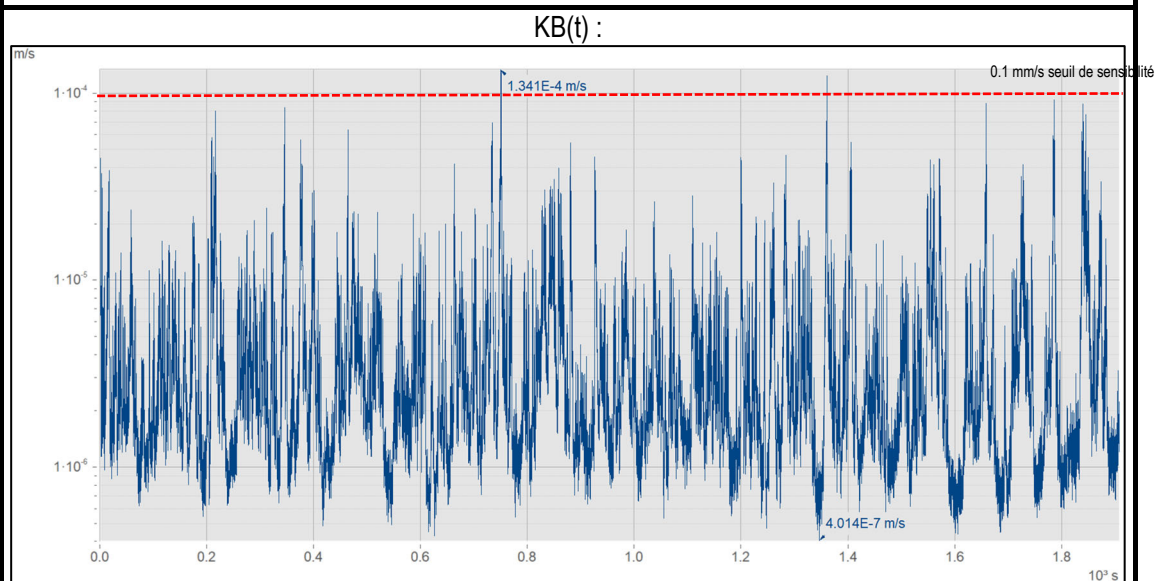
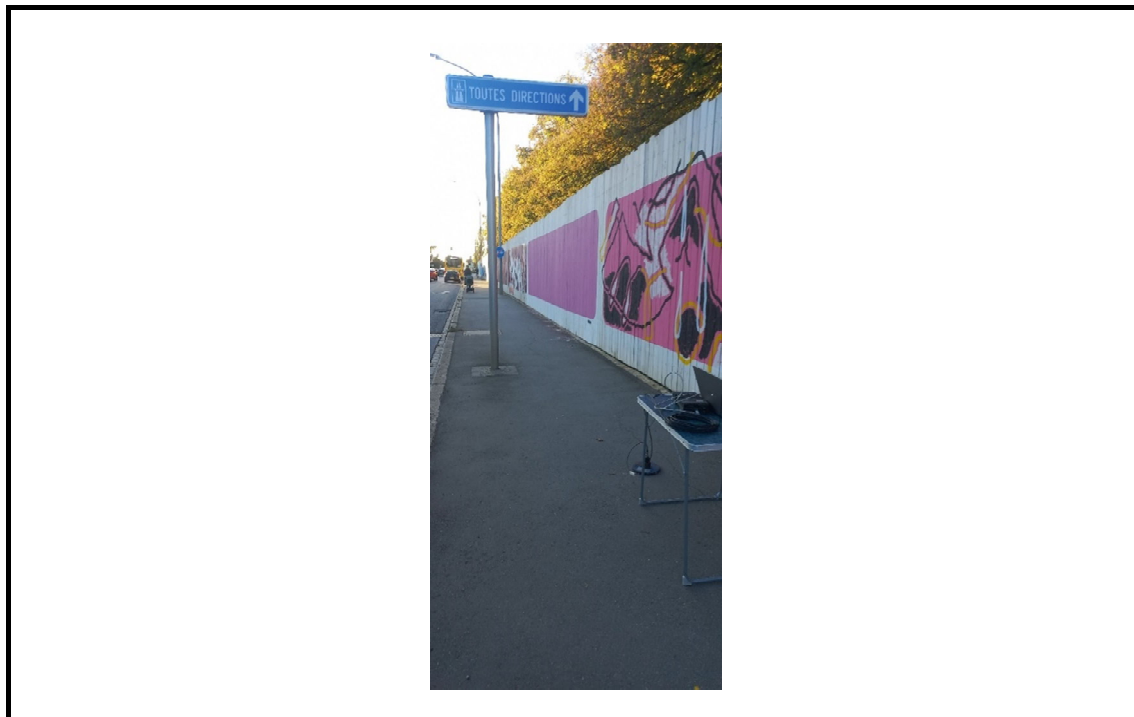
KB(t) :



Commentaires sur les mesures de l'existant :

- Durée des mesures : 60 minutes
- $KBFTM=0.0077\text{mm/s}$
- $KBFmax=0.028\text{mm/s}$
- Niveaux vibratoires mesurés faibles (niveau max  $< 0.1\text{mm/s}$  le seuil de sensibilité)

### 4.3.3 Point 3 : route d'Arlon, hôpital



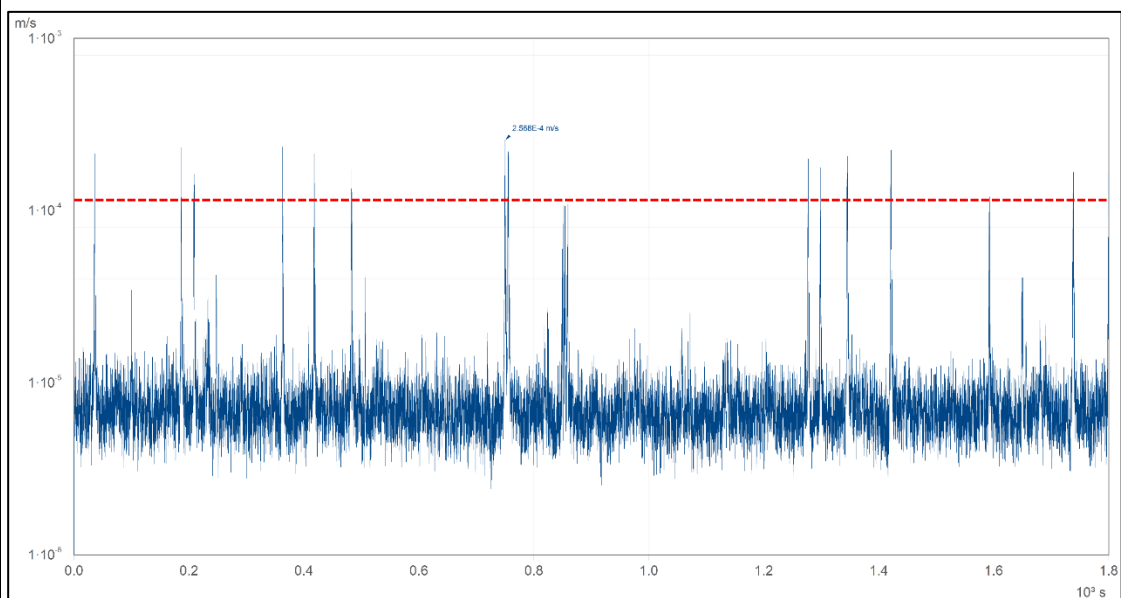
Commentaires sur les mesures de l'existant :

- Durée des mesures : 30 minutes
- KBFTM=0.043mm/s
- KBFmax=0.13mm/s
- Zone présentant des niveaux vibratoires un peu plus élevés pouvant dépasser le seuil de sensibilité de 0.1 mm/s. Les vibrations sont principalement liées au trafic routier.

#### 4.3.4 Point 4 : 243 route d'Arlon



KB(t) :

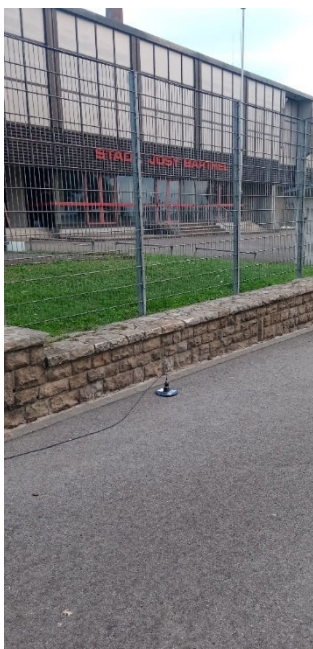


Commentaires sur les mesures de l'existant :

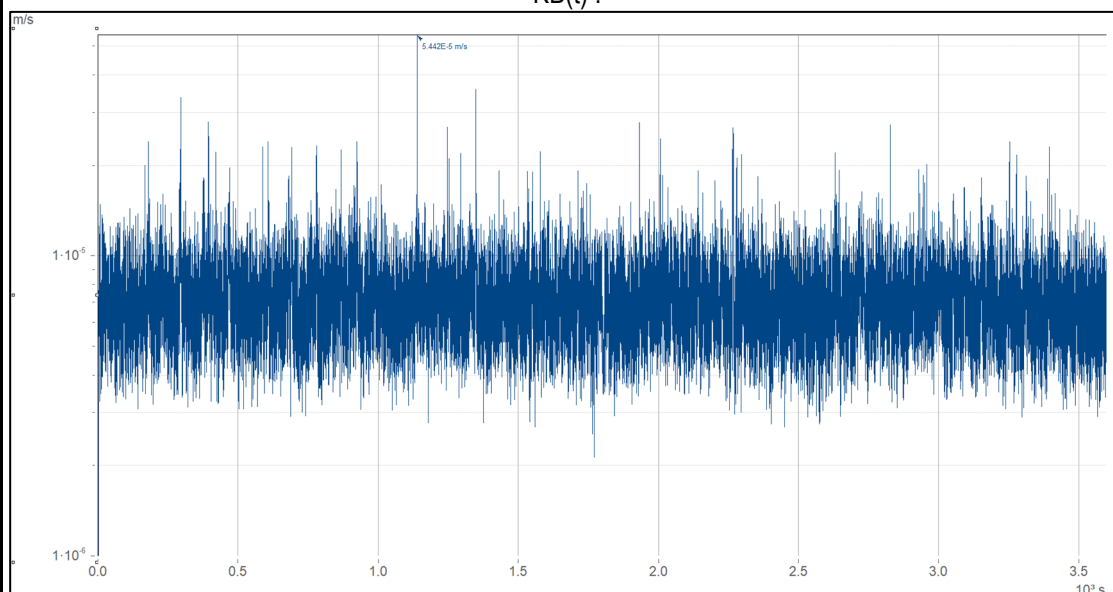
- Durée des mesures : 30 minutes
- KBFTM=0.095mm/s
- KBFmax=0.27mm/s
- Zone présentant les niveaux vibratoires les plus élevés parmi les 6 zones mesurées. Les vibrations sont principalement dues au trafic routier et les niveaux les plus élevés au passage de bus dans des irrégularités sur la route (génération de chocs)



#### 4.3.5 Point 5 : Route d'Arlon, stade Josy Barthel



KB(t) :



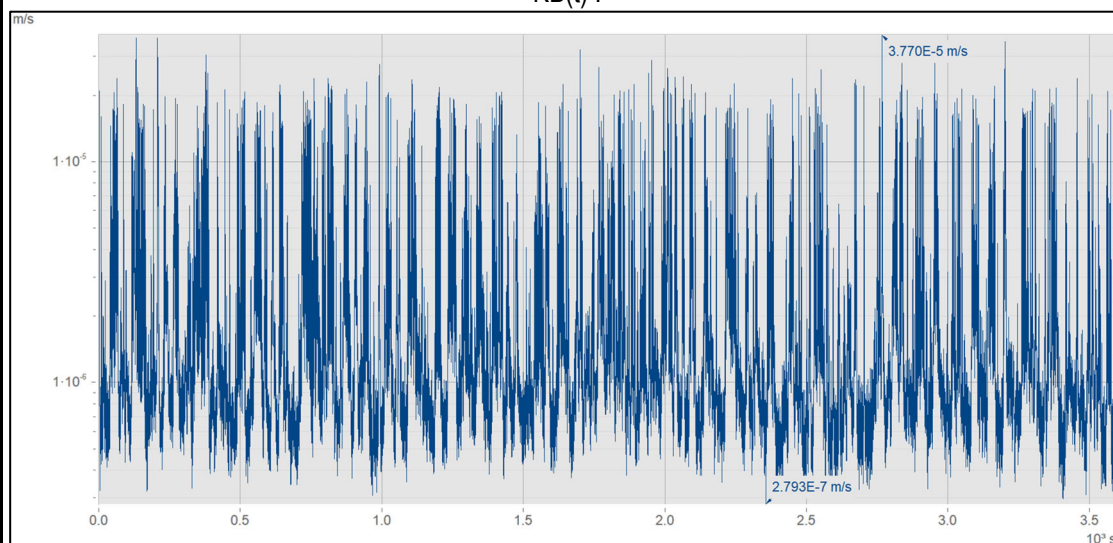
Commentaires sur les mesures de l'existant :

- Durée des mesures : 60 minutes
- KBFTM=0.015mm/s
- KBFmax=0.054mm/s
- Les niveaux vibratoires mesurés sont faibles (niveau max < 0.1mm/s le seuil de sensibilité) et principalement liés au trafic routier

#### 4.3.6 Point 6 : 70 route d'Arlon, angle rue des foyers



KB(t) :



Commentaires sur les mesures de l'existant :

- Durée des mesures : 60 minutes
- KBFTM=0.019mm/s
- KBFmax=0.038mm/s
- Niveaux vibratoires mesurés faibles (niveau max < 0.1mm/s le seuil de sensibilité)

#### 4.3.7 Bilan

Le Tableau 2 résume les mesures vibratoires de l'état initial. Pour rappel, le seuil de sensibilité humain aux vibrations est de 0.1mm/s.

Point	KBfmax [mm/s]	KBFTm [mm/s]
1	0.029	0.0078
2	0.028	0.0077
3	0.13	0.043
4	0.27	0.095
5	0.054	0.015
6	0.038	0.019

Tableau 2 : Bilan de l'état vibratoire initial

L'échelle de couleur est relative et n'est pas une comparaison entre ces mesures et un éventuel critère : les valeurs tendant vers le rouge sont les plus élevées, vers le vert les plus faibles mesurées.

Les résultats de mesures sur site ont permis d'établir l'état initial du niveau vibratoire de la zone, avant l'implantation de la voie de tramway.

Ces mesures montrent un niveau vibratoire moyen (KBFTm) au sol inférieur au seuil de sensibilité humain sur les 6 zones (0.1mm/s).

Le niveau vibratoire dépasse ponctuellement le seuil de sensibilité humain, notamment au point 4 devant lequel un trou dans la chaussée est à l'origine de choc lors du passage d'une roue de véhicule routier.

#### 4.4 Résultats de la caractérisation des sols

Les mobilités de transferts vibratoires dans la zone hôpital et stade sont affichées en Figure 9. Pour information, la distance entre l'impact et la mesure de vibration est de 6m pour ces graphiques.

Ces mobilités ne sont pas utilisées directement dans le calcul mais utilisées afin d'appréhender le comportement du sol dans la zone et éventuellement corriger le modèle de sol construit à partir des données du rapport géotechnique [2].

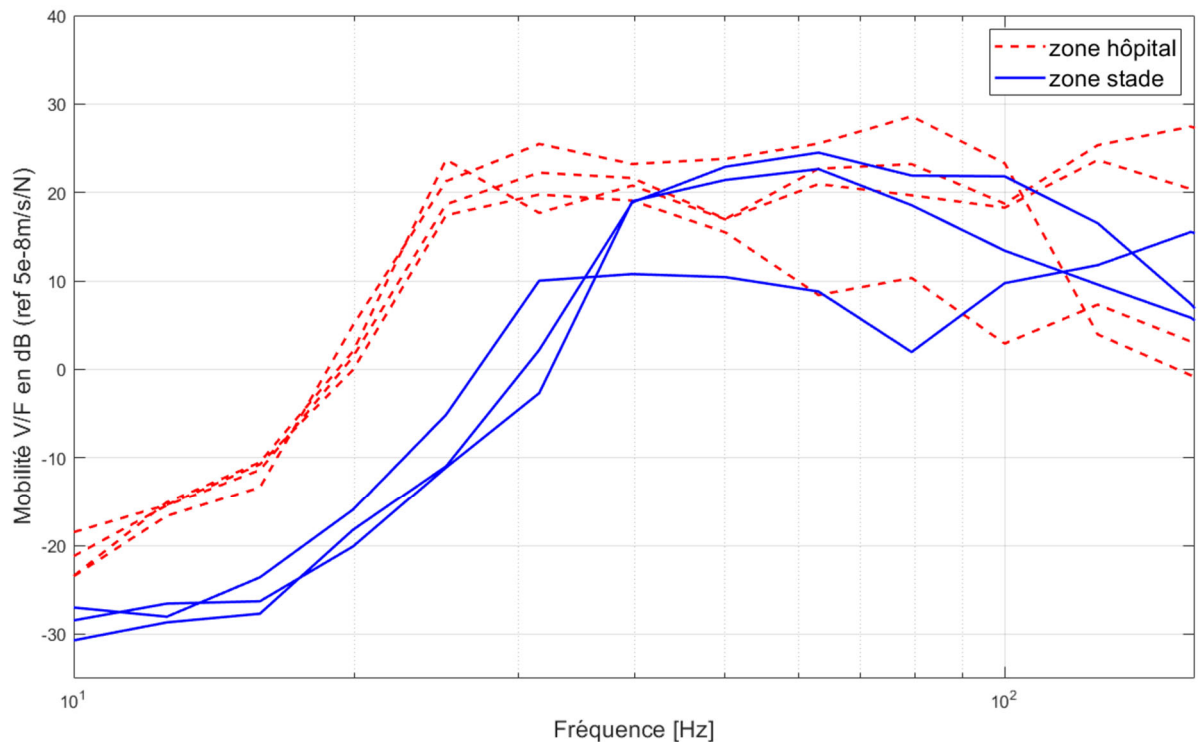


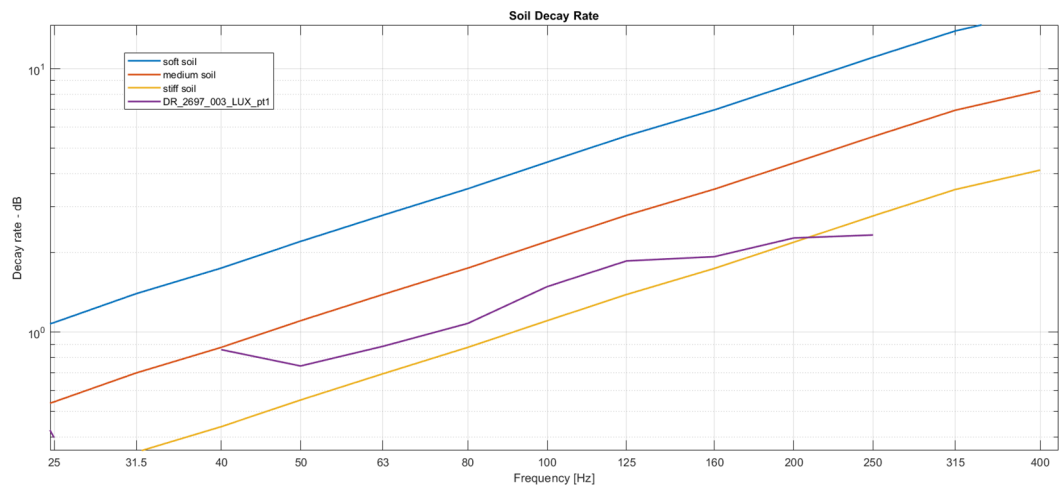
Figure 9 : Caractérisation des sols des zones hôpital et stade : mobilités de transfert

NB : il existe 3 courbes de chaque couleur car les caractérisations ont été réalisées à 3 endroits pour chacune des zones hôpital et stade.

On relève sur ces mesures des amplifications importantes du transfert vibratoire à certaines fréquences (par exemple aux alentours de 30Hz sur les transferts zone hôpital). Ces amplifications sont dues aux aménagements urbains (bitumes trottoir, bordure) et ne sont pas représentatives du comportement des sols en profondeur. En dehors de ces amplifications, on retrouve une mobilité cohérente avec la modélisation construite à partir des données du rapport géotechnique (voir partie 5.1.2).

Une fois ces amplifications modales passées, on peut également observer le taux de décroissance mesuré dans la zone de l'hôpital et le comparer aux modèles de décroissances analytiques (modèle théorique). Le taux de décroissance est un autre type de post-traitement de mesure de transfert vibratoire visant à estimer de combien la vibration s'atténue par mètre lors de sa propagation.





**Figure 10 : Taux de décroissance mesuré comparé aux taux de décroissance théoriques**

NB : le taux de décroissance ci-dessus est estimé à partir des mesures de décroissance réalisées à proximité de l'hôpital.

La décroissance mesurée est cohérente avec le comportement d'un sol moyen à dur, ce qui est également cohérent avec les données de sol à disposition. Ce taux de décroissance, représentant l'atténuation du niveau vibratoire par mètre, n'est pas utilisé dans le calcul mais simplement calculé ici pour mieux appréhender le comportement du sol et confirmer les données présentes dans le rapport géotechnique.

## 5. MODELISATION DE L'IMPACT VIBRATOIRE DE LA CIRCULATION DES TRAMWAYS

### 5.1 Méthodologie

On distingue trois étapes dans la méthodologie d'estimation du niveau vibratoire et de bruit solidien dans un bâtiment dus à une circulation ferroviaire :

1. Calcul de l'excitation au niveau de la voie due aux mouvements d'un matériel ferroviaire sur une voie (terme source),
2. Calcul de la propagation des vibrations depuis la voie jusqu'au bâtiment (terme propagatif),
3. Calcul de la réception des vibrations par le bâtiment et du bruit solidien émis dans le bâtiment (terme immission).

#### 5.1.1 Terme source

Le terme source est calculé à l'aide du logiciel GroundVib développé en 2000 par notre partenaire Vibratex dans le cadre d'un projet de recherche européen et validé au travers de nombreux projets. Le modèle prend en compte à la fois les caractéristiques du matériel roulant CAF Urbos, ainsi que les caractéristiques de la voie.

Les données utilisées pour le calcul de ce terme source sont indiquées en annexe 8.2

#### 5.1.2 Terme propagatif

Une fois le niveau vibratoire établi au niveau de la voie, la réponse du sol et la propagation des vibrations jusqu'aux bâtiments est calculée via le logiciel Mefisto.

Comme indiqué dans la partie 4.4, les mesures réalisées sur site permettent de corriger le modèle de sol en complément des informations disponibles dans le rapport géotechnique [2].

Les détails concernant cette modélisation sont indiqués en annexe 8.3.

#### 5.1.3 Terme immission

On utilisera les données établies lors du projet européen RIVAS permettant la modélisation du comportement des bâtiments par fonction de transfert à partir de leur caractéristiques (type de bâtiments, type de plancher, type de sol sous le bâtiment). Cette fonction de transfert est constituée de trois parties :

1. Transfert vibratoire entre le sol et la fondation du bâtiment, appelé TF2
2. Transfert vibratoire entre la fondation du bâtiment et le plancher d'une pièce, appelé TF3
3. Transfert vibro-acoustique entre les vibrations du plancher d'une pièce et le bruit solidien

On étudiera donc le type de bâtiments présents dans la zone afin d'utiliser les fonctions de transfert adéquates.

En l'absence de données sur les planchers à l'intérieur des bâtiments, le transfert plancher le plus critique issu du projet européen RIVAS est utilisé. Afin d'identifier le plancher le plus critique, les calculs sont réalisés pour toutes les configurations de planchers de la base de données et le résultat le plus conservatif est conservé et affiché en résultats.

Concernant la présence de fondations pour les grands bâtiments de la zone, potentiellement sollicitées par les ondes volumiques présentes pour la partie en tranchée couverte, cet effet est pris en compte en utilisant les transferts vibratoires RIVAS correspondants à l'implantation d'un bâtiment sur sol dur.

Il est important de noter que l'établissement sur site de transferts vibratoires bâtiments et planchers aurait permis d'augmenter la précision des prévisions. Il n'a toutefois pas été possible sur ce projet de réaliser ces mesures (besoin d'accès à l'intérieur des bâtiments pour réaliser ces mesures).

## 5.2 Bâtiments analysés

Les bâtiments ci-dessous sont identifiés pour l'analyse. Certains bâtiments présentant des caractéristiques et situations identiques sont regroupés dans une configuration commune.

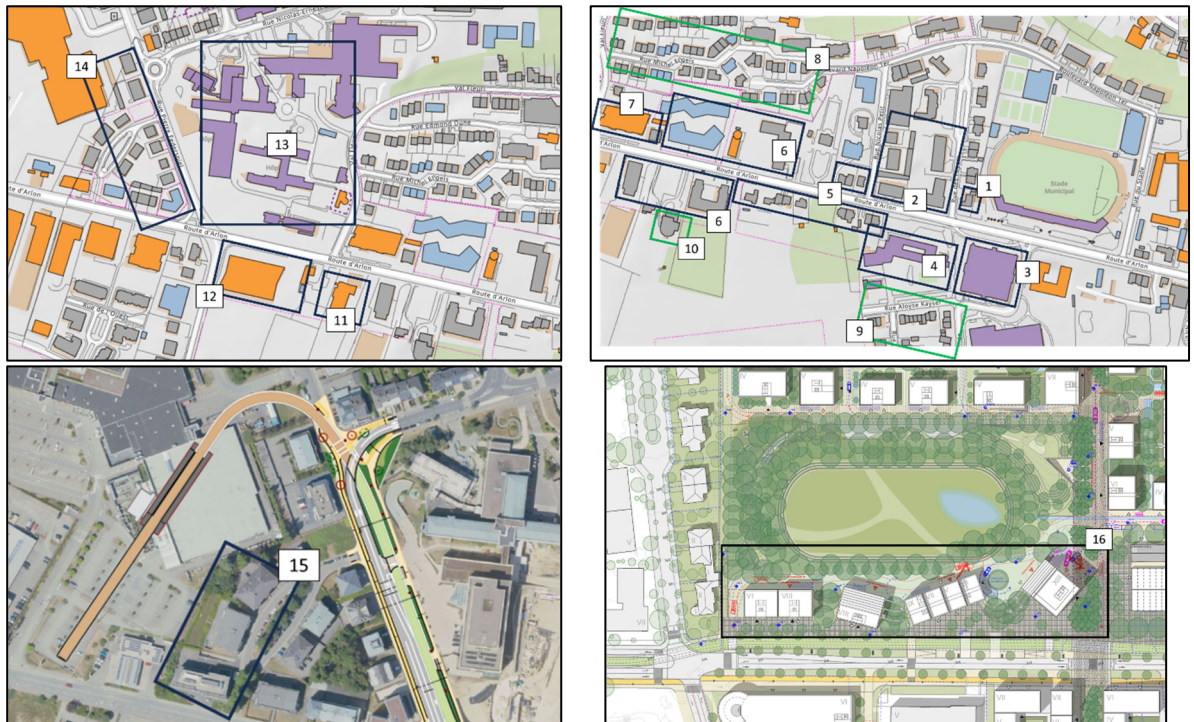


Figure 11 : Identification des bâtiments à analyser

Les caractéristiques des configurations identifiées sur le plan sont présentées dans le

Zone	Type de bâtiments	Activité	Distance de la voie [m]	Configuration de la voie	Vitesse de circulation [km/h]
1	Maison	Habitations	20	Surface	30
2	Immeuble haut	Habitations	10	Tranchée couverte	50 ou 70
3	Parking				
4	Immeuble bas	Ecole	50	Tranchée couverte	50 ou 70
5	Maison	Habitations	15	Tranchée couverte	50 ou 70
6	Immeuble haut	Habitations	15	Tranchée couverte	50 ou 70
7	Immeuble haut	Bureau	20	Tranchée couverte	50 ou 70
8	Maison	Habitations	90	Tranchée couverte	50 ou 70
9	Maison	Habitations	>100	Tranchée couverte	50 ou 70
10	Maison	Habitations	65	Tranchée couverte	50 ou 70
11	Immeuble haut	Habitations + centre de santé	20	Tranchée couverte	50 ou 70
12	Immeuble haut	Bureau	25	Surface	30
13	Immeuble haut	Hôpital route d'Arlon	30	Sortie de tranchée couverte*	50
13bis	Immeuble haut	Hôpital rue Federspiel	15	Surface	30
14	Immeuble bas	Habitations	10-25	Surface	30
15	Immeuble bas	Habitations	>70	Surface	30
16	Immeuble haut	Habitations	10-15	Surface	30

Tableau 3. Ce tableau récapitulatif permet de couvrir exhaustivement les cas sur le tronçon. Toutefois, seuls les calculs sur les configurations identifiées critiques sont réalisés.

Pour la zone tranchée couverte, 2 hypothèses de vitesse de circulation ont été retenues :

- 50km/h
- 70km/h

Les calculs sont réalisés pour ces 2 vitesses dans cette zone.

Zone	Type de bâtiments	Activité	Distance de la voie [m]	Configuration de la voie	Vitesse de circulation [km/h]
1	Maison	Habitations	20	Surface	30
2	Immeuble haut	Habitations	10	Tranchée couverte	50 ou 70
3	Parking				
4	Immeuble bas	Ecole	50	Tranchée couverte	50 ou 70
5	Maison	Habitations	15	Tranchée couverte	50 ou 70
6	Immeuble haut	Habitations	15	Tranchée couverte	50 ou 70
7	Immeuble haut	Bureau	20	Tranchée couverte	50 ou 70
8	Maison	Habitations	90	Tranchée couverte	50 ou 70
9	Maison	Habitations	>100	Tranchée couverte	50 ou 70
10	Maison	Habitations	65	Tranchée couverte	50 ou 70
11	Immeuble haut	Habitations + centre de santé	20	Tranchée couverte	50 ou 70
12	Immeuble haut	Bureau	25	Surface	30
13	Immeuble haut	Hôpital route d'Arlon	30	Sortie de tranchée couverte*	50
13bis	Immeuble haut	Hôpital rue Federspiel	15	Surface	30
14	Immeuble bas	Habitations	10-25	Surface	30
15	Immeuble bas	Habitations	>70	Surface	30
16	Immeuble haut	Habitations	10-15	Surface	30

**Tableau 3 : Caractéristiques des configurations de bâtiments à analyser**

*\*pour ces bâtiments en sortie de tranchée couverte, les calculs sont réalisés dans la configuration surface car le transfert vibratoire est plus critique dans cette configuration (approche conservative).*

Le tracé et les arrêts prévus sur le tronçon sont présentés sur la Figure 1 .

### 5.3 Résultats

Les résultats sont affichés par zone, chaque zone étant caractérisée par un transfert sol différent :

1. Zone tranchée couverte,
2. Zone hôpital,
3. Zone stade.

Les résultats sont affichés dans des tableaux récapitulatifs présentant, pour les configurations critiques de bâtiments, le niveau vibratoire équivalent KBFmax et KBFtr selon la DIN 4150-2 ainsi que le niveau de pression acoustique Lp en dB(A) référence 2<sup>e</sup>-5Pa dans les 3 configurations de voies envisagées.

Pour le calcul du KBFtr, un passage de rame toutes les 5 minutes sur chaque voie de circulation a été considéré.

Les critères retenus en fonction du type de bâtiment sont les suivants :

	Critère sur le niveau max DIN 4150-2	Critère prenant en compte la fréquence de passage DIN 4150-2		Critère de bruit solidien VDI 2719
Type de bâtiment	KBFmax [mm/s]	KBFtr [mm/s]	KBFmax [mm/s]	Lp en dB(A) ref 2e-5Pa
Habitations	0.1	0.05	0.2	Limite basse : 35
				Limite haute : 40
Bureaux	0.2	0.1	0.4	Limite basse : 40
				Limite haute : 50
Hôpital	0.1	0.05	0.15	Limite basse : 35
				Limite haute : 40

**Tableau 4 : Critères de validation retenus**

La VDI donne une plage de valeur pour le critère sur le bruit solidien. En fonction du niveau de performance recherché, 2 recommandations de pose de voie sont faites :

- Une recommandation pour respecter la valeur basse de la plage fournie par la VDI (critère le plus exigeant). Le résultat est alors affiché en vert
- Une recommandation pour respecter la valeur haute de la VDI (critère moins exigeant). Le résultat est alors affiché en jaune



### 5.3.1 Zone tranchée couverte

La zone en tranchée couverte est présentée sur la figure ci-dessous :



**Figure 12 : Zone en tranchée couverte étudiée**

Les paramètres retenus pour cette configuration sont :

- Voie en tranchée couverte
- Vitesse de circulation : 50km/h et 70 km/h

**Remarque importante :** les calculs ont été réalisés avec une pose -20dB à partir de 63 Hz.

#### 5.3.1.1 *Hypothèse de vitesse de circulation de 50km/h*

La pose de voie recommandée pour tenir les critères pour la configuration traitée est affichée en dernière colonne.

Zone	Type de bâtiments	Activité	Distance de la voie [m]	Pose	KBFmax [mm/s]	KBFtr [mm/s]	Lp dB(A) ref 2e-5Pa	Pose recommandée
2	Immeuble haut	Habitations	10	Standard	0.075	0.020	41.8	-8dB
				-8dB	0.042	0.011	31.8	
				-20dB	0.046	0.013	19.1	
5	Maison	Habitations	15	Standard	0.280	0.074	52.3	-20dB
				-8dB	0.117	0.031	42.2	
				-20dB	0.175	0.047	29	
6	Immeuble haut	Habitations	15	Standard	0.062	0.017	40.6	-8dB
				-8dB	0.033	0.008	30.2	
				-20dB	0.044	0.011	17.5	
11	Immeuble haut	Habitations + centre de santé	20	Standard	0.050	0.013	39.2	Standard, respect valeur haute VDI -8dB, respect valeur basse VDI
				-8dB	0.025	0.007	28.5	
				-20dB	0.039	0.010	15.6	

**Tableau 5 : Résultats de la zone tranchée couverte, vitesse de circulation de 50km/h**

La pose de -20dB envisagée pour la partie tranchée couverte permet de tenir les critères sur l'ensemble de la zone. Les marges sont assez faibles sur le confort vibratoire en pose -20dB sur la configuration 5 qui est la configuration critique de la zone : cette configuration, présente sur une portion longue de la tranchée couverte, impose la pose -20dB.

### 5.3.1.2 Hypothèse de vitesse de circulation de 70km/h

Pour une vitesse de circulation de 70km/h, l'augmentation de la vitesse entraîne une augmentation globale du niveau sur toute la plage de fréquence. Le calcul peut donc être mené uniquement sur la configuration la plus critique du cas à 50km/h, la configuration 5.

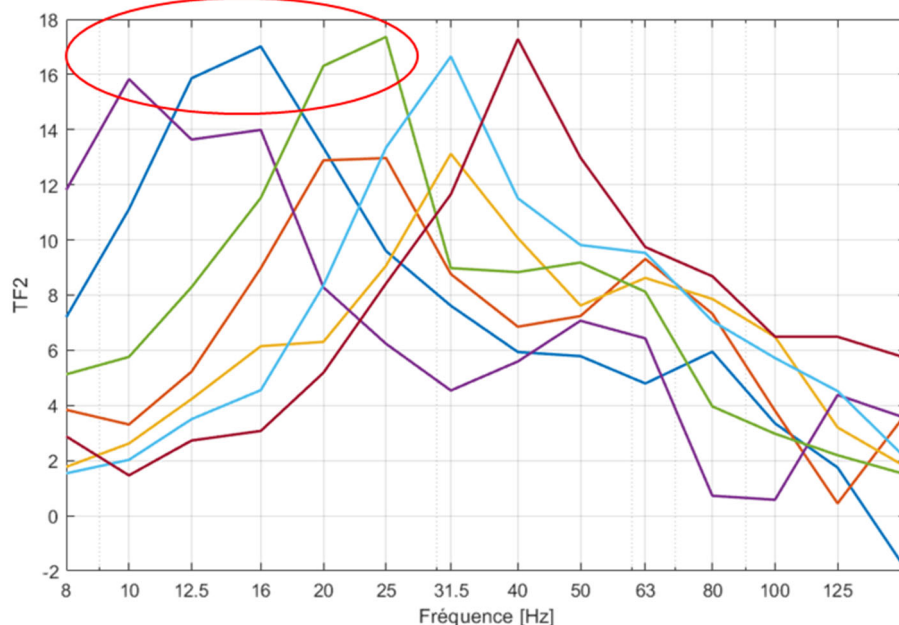
Zone	Type de bâtiments	Activité	Distance de la voie [m]	Pose	KBFmax [mm/s]	KBFtr [mm/s]	Lp dB(A) ref 2e-5Pa	Pose recommandée
5	Maison	Habitations	15	Standard	0.370	0.097	57.2	X
				-8dB	0.154	0.041	46.1	
				-20dB	0.231	0.061	33	

**Tableau 6 : Résultats de la zone tranchée couverte pour la configuration critique (configuration 5), vitesse de circulation de 70km/h**

Les marges par rapport aux critères sont faibles à 50km/h. A 70km/h, le critère de confort vibratoire de la DIN 4150-2 n'est plus respecté même avec une pose à - 20 dB.

La pose -20dB sur dalle flottante est caractérisée par un mode de suspension basse fréquence, mode qui n'existe pas sur les poses de type directe (standard et -8dB). Dans la modélisation, ce mode est situé à environ 16Hz.

Comme indiqué dans la partie 5.1.3, le type de plancher dans les bâtiments étant inconnu, les calculs sont réalisés avec l'ensemble des transferts planchers de la base de données RIVAS et le résultat le plus critique est conservé. Les niveaux vibratoires basse fréquence obtenus, responsables du dépassement de critère identifié, sont dus à la proximité d'un mode de résonance d'un plancher de la base de données avec le mode de dalle flottante.



**Figure 13 : Base de données de fonctions de transfert plancher, résonances alignées avec le mode de dalle flottante entourées en rouge**

Sans ces configurations critiques de plancher peu compatibles avec la pose, les niveaux redescendent sous les critères. Afin de permettre la circulation à 70 km/h tout en respectant les seuils vibratoires réglementaires, une solution de pose spécifique est prévue en tunnel. Celle-ci consiste en l'utilisation de prédalles sur appuis résilients (plots ou bandes), offrant une atténuation vibratoire plus performante que les dispositifs couramment utilisés en surface (supérieure à -20 dB). À ce stade des études, les hypothèses retenues intègrent les performances maximales envisageables.



Toutefois, le choix définitif du type d'appui (plots ponctuels, bandes longitudinales ou tapis surfacique) ne pourra être validé qu'après caractérisation in situ de la fonction de transfert vibratoire entre les fondations des bâtiments et les planchers. Cette étape est nécessaire afin de permettre d'optimiser le choix de la pose de voie (d'un point de vue performance et financier) et d'estimer plus précisément les risques de dépassement des niveaux vibratoires vis-à-vis de la réglementation (bruit solide et confort vibratoire).

### 5.3.2 Zone hôpital

La localisation des zones est présentée ci-dessous :

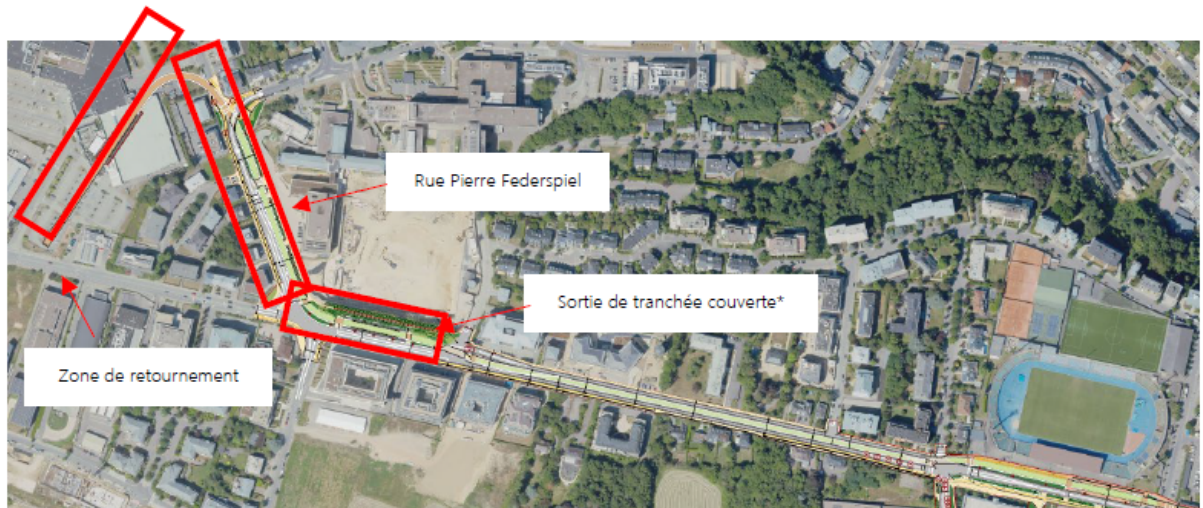


Figure 14 : Localisation des zones dans le secteur hôpital

On rappelle que cette zone en sortie de tranchée couverte est calculée en configuration surface car le transfert vibratoire est plus critique dans cette configuration (approche conservative).

#### 5.3.2.1 *Secteur route d'Arlon, sortie de tranchée couverte*

Les paramètres retenus pour cette configuration sont :

- Transfert voie en surface
- Vitesse de circulation de 50km/h et 70 km/h

La pose de voie recommandée pour tenir les critères pour la configuration traitée est affichée en dernière colonne.

Zone	Type de bâtiments	Activité	Distance mini de la voie [m]	Pose	KBfma x [mm/s]	KBftr [mm/s]	Lp dB(A) ref 2e-5Pa	Pose recommandée
12	Immeuble haut	Bureau	25	Standard	0.138	0.036	50	-8dB, respect valeur haute VDI -20dB, respect valeur basse VDI
				-8dB	0.12	0.032	43.5	
				-20dB	0.06	0.016	24.9	
13	Immeuble haut	Hôpital	30	Standard	0.122	0.032	48.6	-20dB
				-8dB	0.109	0.029	42.1	
				-20dB	0.05	0.013	23.8	

Tableau 7 : Résultats de la zone sortie de tranchée couverte, vitesse de circulation de 50km/h

Il est recommandé de prolonger la pose -20dB de la tranchée couverte en sortie de tranchée couverte devant l'hôpital route d'Arlon afin de respecter les critères pour l'hôpital.

Bien que la sortie de tranchée couverte devant l'hôpital se trouve à proximité d'une courbe, laissant supposer que la vitesse de circulation sera plus faible, les calculs sont également menés dans cette zone avec une vitesse de 70km/h :

Zone	Type de bâtiments	Activité	Distance mini de la voie [m]	Pose	KBFmax [mm/s]	KBFtr [mm/s]	Lp dB(A) ref 2e-5Pa	pose minimum à envisager
13	Immeuble haut	Hôpital	30	Standard	0.161	0.042	51.1	-20dB
				-8dB	0.143	0.038	44.7	
				-20dB	0.066	0.017	26.2	

**Tableau 8 : Résultats de la zone sortie de tranchée couverte, vitesse de circulation de 70km/h**

La pose -20dB permet également de respecter les critères à 70km/h pour ces configurations en sortie de tranchée couverte.

### 5.3.2.2 Secteur rue Pierre Federspiel

Les paramètres retenus pour cette configuration sont :

- Voie en surface
- Vitesse de circulation : 30km/h

La pose de voie recommandée pour tenir les critères pour la configuration traitée est affichée en dernière colonne.

Zone	Type de bâtiments	Activité	Distance mini de la voie [m]	Pose	KBFmax [mm/s]	KBFtr [mm/s]	Lp dB(A) ref 2e-5Pa	Pose recommandée
13bis	Immeuble haut	Hôpital	15	Standard	0.127	0.034	49.1	-20dB
				-8dB	0.112	0.030	42.7	
				-20dB	0.046	0.012	24.2	
			25	Standard	0.089	0.023	45.7	-8dB, respect valeur haute VDI -20dB, respect valeur basse VDI
				-8dB	0.078	0.021	39.3	
				-20dB	0.039	0.010	21	
14	Immeuble bas	Habitations	10	Standard	0.163	0.043	51.3	-20dB
				-8dB	0.147	0.039	44.8	
				-20dB	0.058	0.015	26.3	
			25	Standard	0.089	0.023	45.7	-8dB, respect valeur haute VDI -20dB, respect valeur basse VDI
				-8dB	0.078	0.021	39.3	
				-20dB	0.039	0.010	21	

**Tableau 9 : Résultats de la zone hôpital, secteur rue Federspiel**

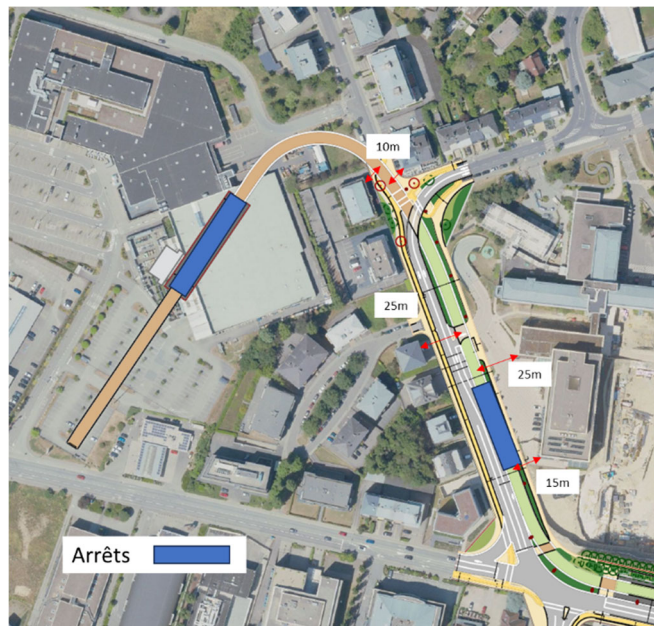


Figure 15 : Identification des bâtiments critiques rue Federspiel

Une pose -20dB est nécessaire tout au long de la rue pour tenir la limite basse de la VDI.

Une pose -8dB est suffisante pour tenir la limite haute de la VDI, à l'exception des 2 zones entourées en rouge Figure 16 :

- Le coin de la maternité situé à 15m de la voie
- Les immeubles au nord de la rue situés à 10m de la voie

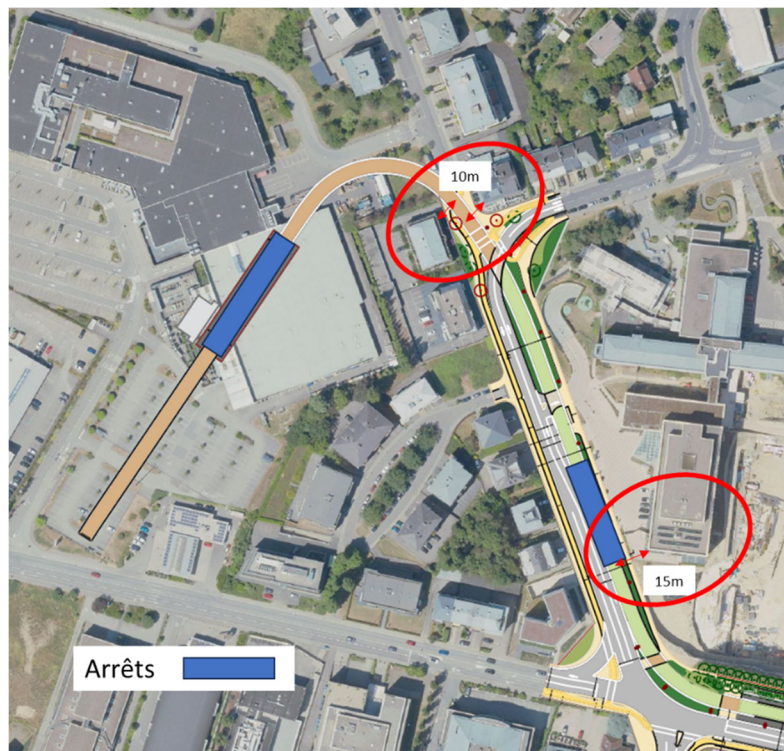


Figure 16 : Bâtiments proches de la voie pour le secteur rue Federspiel

Pour les bâtiments situés à 10m, la pose -20dB est nécessaire également pour tenir la limite haute de la VDI. Pour le coin d'hôpital (maternité) situé à 15m de la voie, nous pouvons voir qu'un arrêt est prévu au droit de ce coin critique. La vitesse de passage des trams sera donc plus faible que 30km/h à ce niveau.

Les calculs sont réalisés pour ce coin d'hôpital à une vitesse de 15km/h, les résultats sont affichés dans le tableau ci-dessous :

Zone	Type de bâtiments	Activité	Distance mini de la voie [m]	Pose	KBFmax [mm/s]	KBFtr [mm/s]	Lp dB(A) ref 2e-5Pa	Pose recommandée
13bis	Immeuble haut	Hôpital	15	Standard	0.066	0.017	41.8	-8dB, respect valeur haute VDI -20dB, respect valeur basse VDI
				-8dB	0.061	0.016	35.5	
				-20dB	0.026	0.007	18.3	

**Tableau 10 : Résultats hôpital rue Federspiel, hypothèse de circulation à 15km/h en approche de l'arrêt**

A 15km/h, pour cette zone du bâtiment d'hôpital :

- La pose -8dB est suffisante pour tenir la valeur haute de la VDI
- La pose -20dB est nécessaire pour tenir la valeur basse de la VDI

### 5.3.2.3 Secteur de la zone de retournement

Les bâtiments les plus proches sont situés à 70m de la voie. Avec une vitesse de circulation réduite, malgré la présence d'appareil de voie, une pose standard est suffisante pour cette zone.

**N.B :** En l'absence d'informations, les calculs ne considèrent pas ici la présence future de potentiels bâtiments.



### 5.3.2.4 Bâtiment d'hôpital : comparaison des niveaux vibratoires obtenus aux critères pour équipements sensibles

Concernant l'hôpital et la potentielle présence d'appareils sensibles, aucun critère spécifique n'a été fourni. On propose donc de comparer, à titre informatif, les niveaux obtenus aux courbes VC, base de données de critères génériques applicables aux équipements sensibles. Cette base de données, établie dans les années 1980 par Ungar et Gordon, propose des critères sur le niveau vibratoire en fonction de la sensibilité de l'équipement. Les valeurs et la description associée sont présentées dans le Tableau 11.

<b>Critère de courbe</b>	<b>Vitesse , µm/s (µin/s)</b>	<b>Description de l'utilisation</b>
Atelier (ISO)	800 ( 32 000)	Vibration bien perceptible. Convient aux ateliers et aux zones non sensibles.
Bureau (ISO)	400 (16 000)	Vibrations perceptibles. Adapté aux bureaux et zones non sensibles
Journée résidentielle (ISO)	200 (8000)	Vibration à peine perceptible. Convient aux zones de sommeil dans la plupart des cas. Généralement adéquat pour les équipements informatiques, les salles de réveil des hôpitaux, les équipements de test de sondes à semi-conducteurs et les microscopes inférieurs à 40x.
op. Théâtre (ISO)	100 (4000)	Vibration non perceptible. Convient dans la plupart des cas pour les suites chirurgicales, les microscopes à 100X et pour d'autres équipements de faible sensibilité.
VC-A	50 (2000)	Adéquat dans la plupart des cas pour les microscopes optiques jusqu'à 400X, les microbalances, les balances optiques, les aligneurs de proximité et de projection, etc.
VC-B	25 (1000)	Convient pour l'inspection et la lithographie (y compris les steppers) jusqu'à des largeurs de trait de 3 µm.
VC-C	12,5 (500)	Norme appropriée pour les microscopes optiques jusqu'à 1000X, l'équipement d'inspection et d'inspection lithographique (y compris les microscopes électroniques modérément sensibles) jusqu'à une taille de détail de 1 µm, les processus pas à pas/scanner TFT-LCD.
VC-D	6,25 (250)	Convient dans la plupart des cas aux équipements les plus exigeants, notamment les microscopes électroniques (TEM et SEM) et les systèmes E-Beam.

**Tableau 11 : Critères VC pour les équipements sensibles**

Ces critères sont des critères spectraux, il faut donc les comparer aux spectres en fréquence du niveau vibratoire au centre plancher.

Les bâtiments de l'hôpital sont présents dans 2 configurations :

- Route d'Arlon
- Rue Federspiel

### Configuration de l'hôpital route d'Arlon

Les résultats de niveau vibratoire ont été calculés dans cette configuration en partie 5.3.2.1.

Dans la configuration plancher critique, on obtient les résultats à 50km/h en Figure 17 et à 70 km/h en Figure 18:

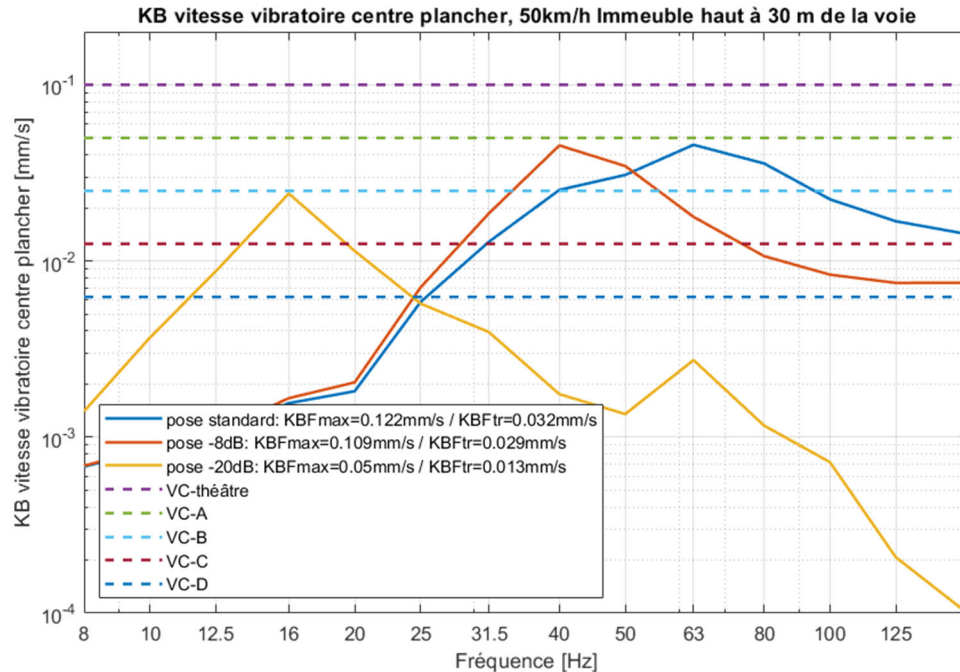


Figure 17 : Comparaison des niveaux vibratoires dans l'hôpital aux critères VC pour équipements sensibles, route-d'Arlon, vitesse de circulation de 50km/h

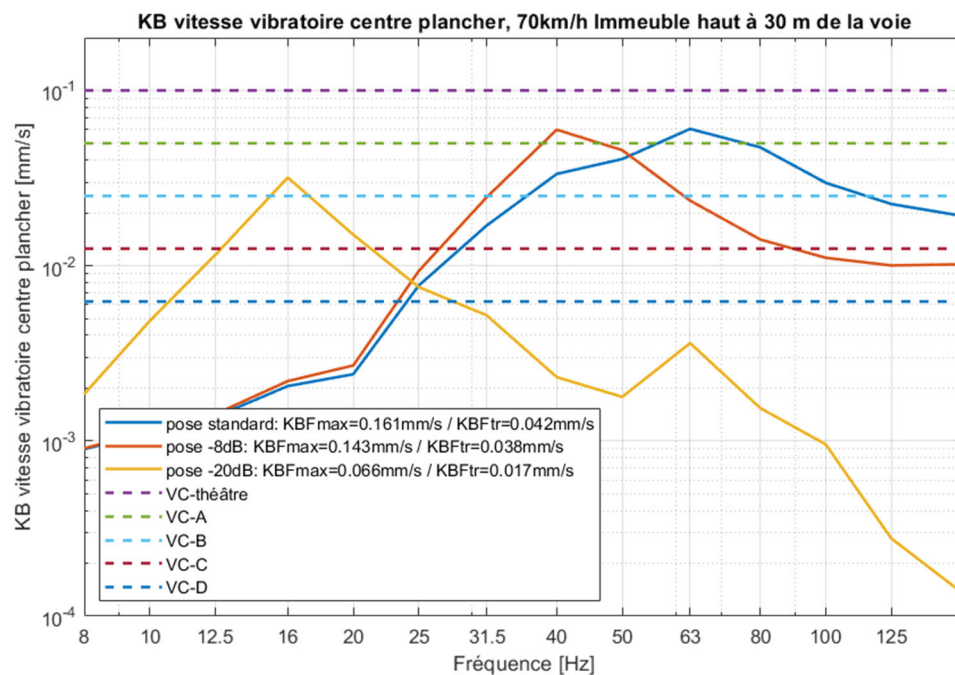


Figure 18 : Comparaison des niveaux vibratoires dans l'hôpital aux critères VC pour équipements sensibles, route-d'Arlon, vitesse de circulation de 70km/h

Pour une pose à -20 dB :

- A 50km/h, le critère VC-B est respecté. Il y a toutefois peu de marge par rapport au critère.
- A 70km/h, le critère VC-A est respecté.

Ces critères sont à mettre vis-à-vis des appareils potentiellement utilisés dans l'hôpital.

Il est important de noter que la distance à la voie a été établie de manière approximative et conservative : il s'agit de la distance approximative entre la future voie et les limites du chantier en cours, visible sur Google Earth.



Figure 19 : Distance entre l'hôpital et la future voie de tram, route d'Arlon

En cas de présence d'équipements sensibles identifiés dans l'hôpital, les calculs peuvent être affinés si les distances du futur bâtiment sont fournies avec plus de précision.

### Configuration de l'hôpital rue Federspiel

Les résultats de niveau vibratoire ont été calculés dans cette configuration en partie 5.3.2.2.

La configuration de l'hôpital conduisant au niveau vibratoire le plus élevé est le coin de bâtiment situé à 25m, avec une vitesse de circulation de 30km/h :

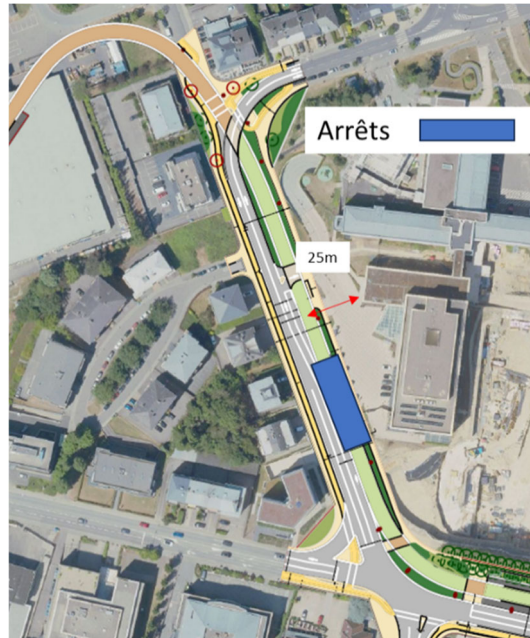


Figure 20 : Zone critique du bâtiment d'hôpital rue Federspiel pour comparaison aux critères équipements sensibles

Pour cette configuration, on obtient les résultats suivants :

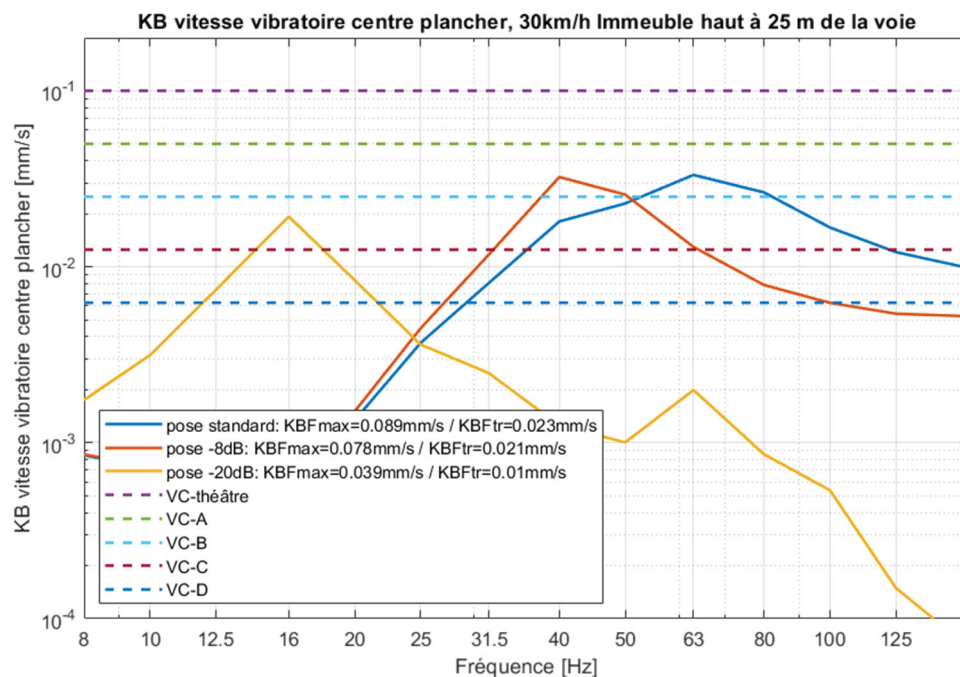


Figure 21 : Comparaison des niveaux vibratoires dans l'hôpital aux critères VC pour équipements sensibles, rue Federspiel, vitesse de circulation de 30km/h

- En pose -8dB, le critère VC-A est respecté
- En pose -20dB, le critère VC-B est respecté

Ces critères sont à mettre vis-à-vis des appareils utilisés dans cette partie de l'hôpital.



### 5.3.3 Zone à proximité du stade Josy Barthel



**Figure 22 : Secteur stade**

Les paramètres retenus pour cette configuration sont :

- Voie en surface
- Vitesse de circulation : 30km/h

La pose de voie minimum à envisager pour tenir les critères pour la configuration traitée est affichée en dernière colonne.

Zone	Type de bâtiments	Activité	Distance mini de la voie [m]	Pose	KBFmax [mm/s]	KBFtr [mm/s]	Lp dB(A) ref 2e-5Pa	Pose recommandée
1	Maison	Habitations	20	Standard	0.126	0.033	53.7	-20dB
				-8dB	0.084	0.022	46.9	
				-20dB	0.111	0.029	25.1	
14	Immeuble bas	Habitations	5	Standard	0.087	0.023	47.3	-20dB
				-8dB	0.079	0.021	40.8	
				-20dB	0.035	0.009	21	
			10	Standard	0.067	0.018	45.3	-8dB, respect valeur haute VDI -20dB, respect valeur basse VDI
				-8dB	0.06	0.016	38.7	
				-20dB	0.034	0.009	18.8	
			15	Standard	0.038	0.01	41	-8dB
				-8dB	0.034	0.009	34.4	
				-20dB	0.032	0.008	14	
			20	Standard	0.028	0.007	38.6	Standard, respect valeur haute VDI -8dB, respect valeur basse VDI
				-8dB	0.024	0.006	31.9	
				-20dB	0.028	0.007	11.4	

**Tableau 12 : Résultats de la zone stade**

Pour la maison individuelle de la configuration 1 située en sortie de tranchée couverte, il est recommandé de prolonger la pose -20dB de la tranchée couverte.

Pour les futurs bâtiments de la configuration 14, le projet n'est à ce jour pas encore bien défini, ne permettant pas d'établir précisément des distances bâtiments-voie. Les recommandations de pose sont donc effectuées pour différentes distances de bâtiments à la voie. Les recommandations de pose seront à affiner selon les règles ci-dessous.

Pour le respect de la valeur basse de la VDI :

- Pose -20dB pour distance bâtiment inférieure ou égale à 10m
- Pose -8dB pour distance bâtiment inférieure ou égale à 25m
- Pose standard au-delà de 25m

Pour le respect de la valeur haute de la VDI :

- Pose -20dB pour distance bâtiment inférieure ou égale à 5m
- Pose -8dB pour distance bâtiment inférieure ou égale à 20m
- Pose standard au-delà de 20m

## 6. CONCLUSION

Les mesures sur sites ont permis :

- D'établir le niveau vibratoire existant dans la zone avant l'installation de la ligne de tramway
- De caractériser le comportement du sol dans la zone, en complément du rapport géotechnique, afin de nourrir la simulation permettant d'établir le niveau vibratoire dû à la circulation des tramways

Point	KBFmax [mm/s]	KBFTm [mm/s]
1	0.029	0.0078
2	0.028	0.0077
3	0.13	0.043
4	0.27	0.095
5	0.054	0.015
6	0.038	0.019

Les niveaux vibratoires mesurés sur site sont faibles et ne présentent pas de particularités. En cas de problématiques avec les riverains suite à la mise en service de la ligne de tramway, ces mesures représentent un état des lieux permettant de quantifier l'éventuelle augmentation du niveau vibratoire.

NB : les niveaux vibratoires les plus élevés mesurés au point 4 sont principalement liés au passage de bus dans des trous sur la route

Dans un second temps, les simulations ont permis d'établir les niveaux vibratoires et de bruits solidiens lors de la circulation des tramways sur le futur tronçon d'Arlon. Ces niveaux sont comparés aux critères applicables pour le projet, permettant d'établir les préconisations de pose de voie.

La VDI 2719 propose une plage de valeur concernant le critère de bruit solidien. **En fonction de la borne à respecter, donc en fonction du niveau d'exigence applicable pour le projet**, 2 bilans de recommandations de pose de voie sont proposés.

### Zone Tranchée couverte

#### Hypothèse de vitesse de circulation de 50km/h

Quel que soit le critère VDI à respecter, la pose de voie de minimum -20dB, prévue initialement pour la section en tranchée couverte, est recommandée.

Il est recommandé de prolonger la pose de voie jusqu'en sortie de tranchée couverte :

- à l'Est pour la maison d'habitation de la configuration 1
- à l'Ouest pour le futur bâtiment d'hôpital, sur la sortie de la tranchée couverte



Figure 23 : Préconisation des poses de voie tranchée couverte, valable pour les 2 niveaux de critères VDI, vitesse de circulation de 50km/h

Pour le futur bâtiment d'hôpital situé route d'Arlon, la pose -20dB permet de tenir le critère VC-B pour les équipements sensibles (voir 5.3.2.4).

#### Hypothèse de vitesse de circulation de 70km/h

A 70km/h, la configuration 5 présente des dépassements de critères de confort vibratoire en pose -20dB. Cela est dû à l'alignement du mode de plancher dans les bâtiments avec le mode de dalle suspendu, comme expliqué en 5.3.1.2.

Afin de permettre la circulation à 70 km/h tout en respectant les seuils vibratoires réglementaires, une solution de pose spécifique est prévue en tunnel. Celle-ci consiste en l'utilisation de prédalles sur appuis résilients (plots ou bandes), offrant une atténuation vibratoire plus performante que les dispositifs couramment utilisés en surface (supérieure à -20 dB). À ce stade des études, les hypothèses retenues intègrent les performances maximales envisageables.

Toutefois, le choix définitif du type d'appui (plots ponctuels, bandes longitudinales ou tapis surfacique) ne pourra être validé qu'après caractérisation in situ de la fonction de transfert vibratoire entre les fondations des bâtiments et les planchers. Cette étape est nécessaire afin de permettre d'optimiser le choix de la pose de voie (d'un point de vue performance et financier) et d'estimer plus précisément les risques de dépassement des niveaux vibratoires vis-à-vis de la réglementation (bruit solidien et confort vibratoire).

La pose -20dB permet de tenir le critère VC-A pour les équipements sensibles (voir 5.3.2.4).



### Zone Hôpital

Deux recommandations sont fournies en fonction du niveau de critère VDI à appliquer pour le projet (valeur basse ou haute de la plage fournie par la VDI).

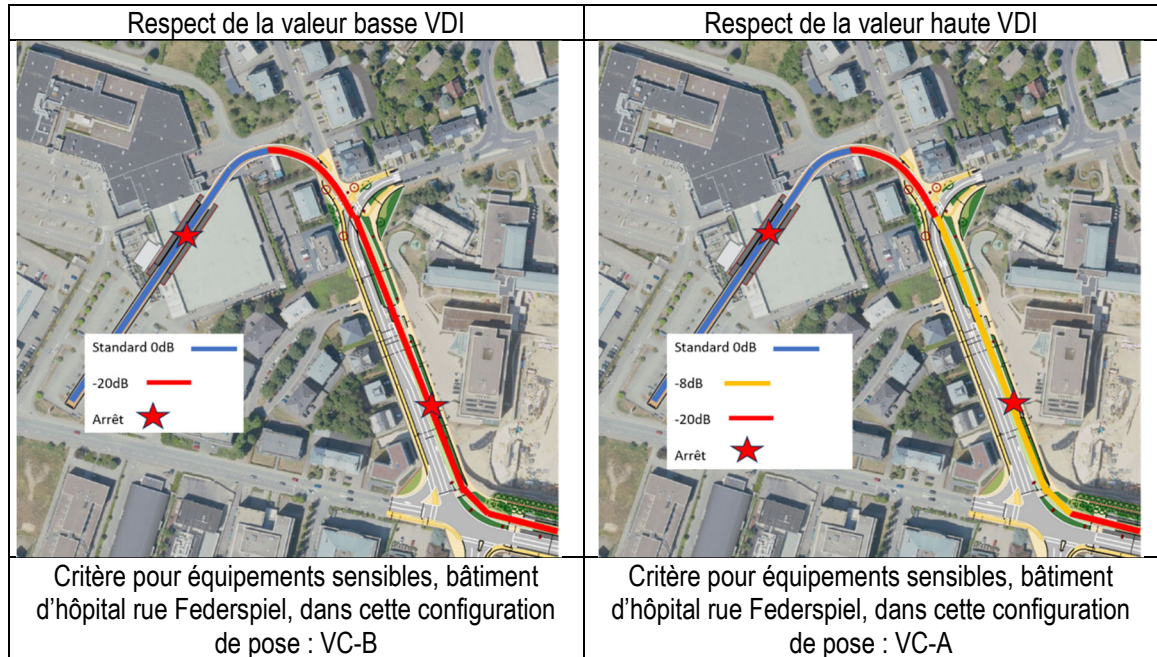


Figure 24 : Préconisations des poses de voie zone Ouest du tronçon, secteur hôpital

Pour les équipements sensibles (voir 5.3.2.4) :

- La pose -8dB permet de tenir le critère VC-A,
- La pose -20dB permet de tenir VC-B.

### Zone Stade

Pour le futur quartier du stade, les distances aux bâtiments ont été établies approximativement à partir des plans à disposition.

Il convient d'appliquer les règles de détermination de la pose de voie établies dans la partie 5.3.3, à adapter en fonction de la borne VDI à appliquer

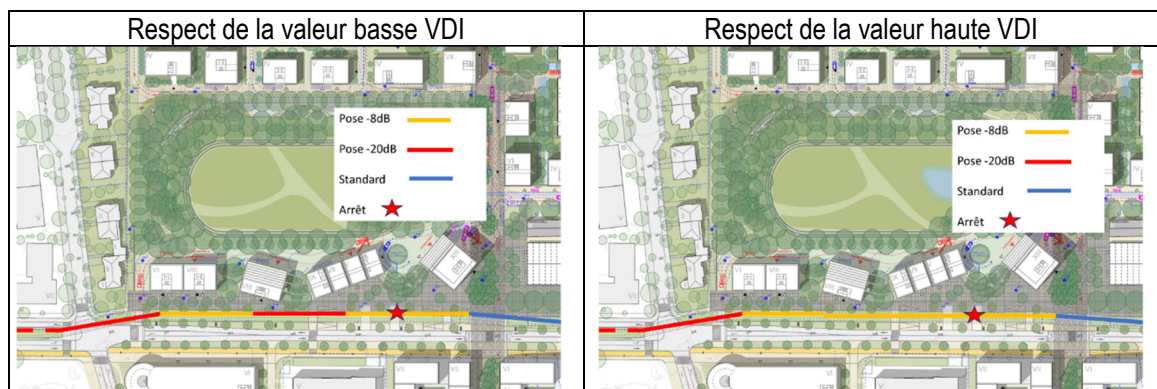


Figure 25 : Préconisations des poses de voie zone Est du tronçon, secteur stade

## 7. COMPLÉMENT – ETUDE DES INCIDENCES ACOUSTIQUES DU PROJET

### 7.1 Introduction

Le 4 novembre 2024, l'autorité compétente a formulé son avis sur le rapport d'évaluation « Luxtram – Tronçon CHL & Pafendall » du 28 octobre 2024. En ce qui concerne l'étude acoustique et vibratoire, une description plus détaillée a été demandée en ce qui concerne la méthodologie de calcul pour le bruit routier, la description de l'environnement sonore existant au niveau de la rue Federspiel et l'affectation/zone qui peut y être considérée. Une analyse complémentaire des habitations situées au nord de la rue Federspiel a également été demandée : des points de calcul supplémentaires ont été prévus à cet effet.

Ce chapitre apporte des éclaircissements sur tous ces points.

Il ressort de l'étude initiale que la zone située au niveau de la rue Federspiel serait la plus impactée par le projet du tramway et que les niveaux actuels y seraient dépassés : ce complément de l'étude d'incidences sur l'environnement se concentre uniquement sur cette zone.

### 7.2 Méthodologie générale

La méthodologie est identique à celle de l'étude initiale (rapport DM-jpc-LU0407-RP2024-0146\_BIS.docx du 25 octobre 2024).

### 7.3 Données

Le modèle tridimensionnel informatique a été repris de l'étude initiale afin d'étudier les impacts en situation actuelle, référence et projetée. Il a toutefois été constaté que la simulation du bâtiment hospitalier actuel ne correspondait pas entièrement à la réalité : elle a donc été adaptée. Les figures ci-dessous présentent la simulation adaptée.

Légende des figures :

- Habitation
- Bureaux
- Commercial
- Institution publique
- Nouvelle construction

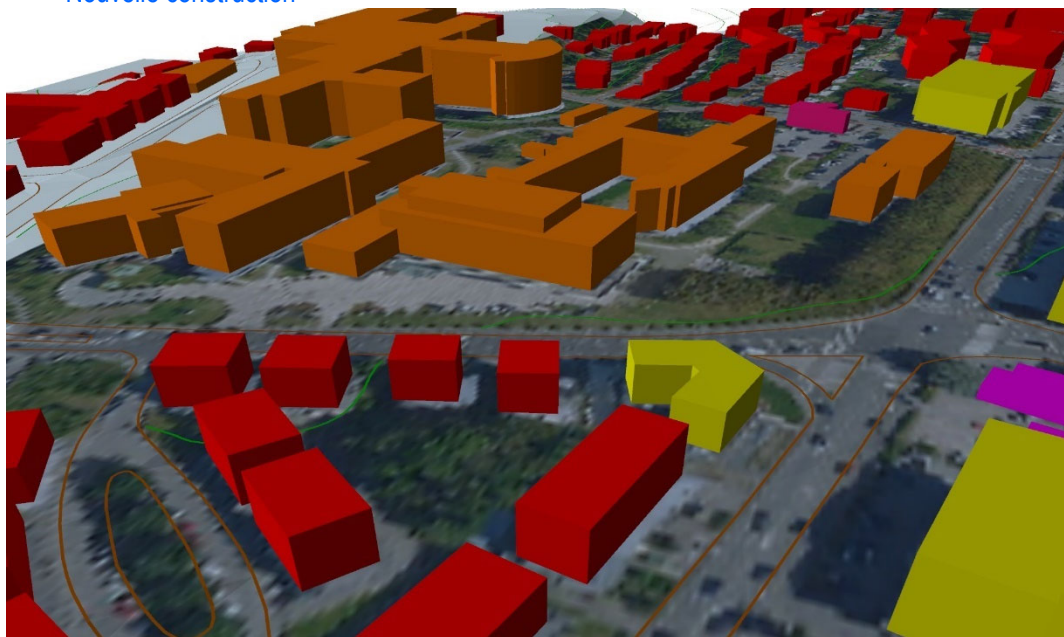


Figure 26 : Vue 3D de la maquette en situation actuelle : zone du CHL

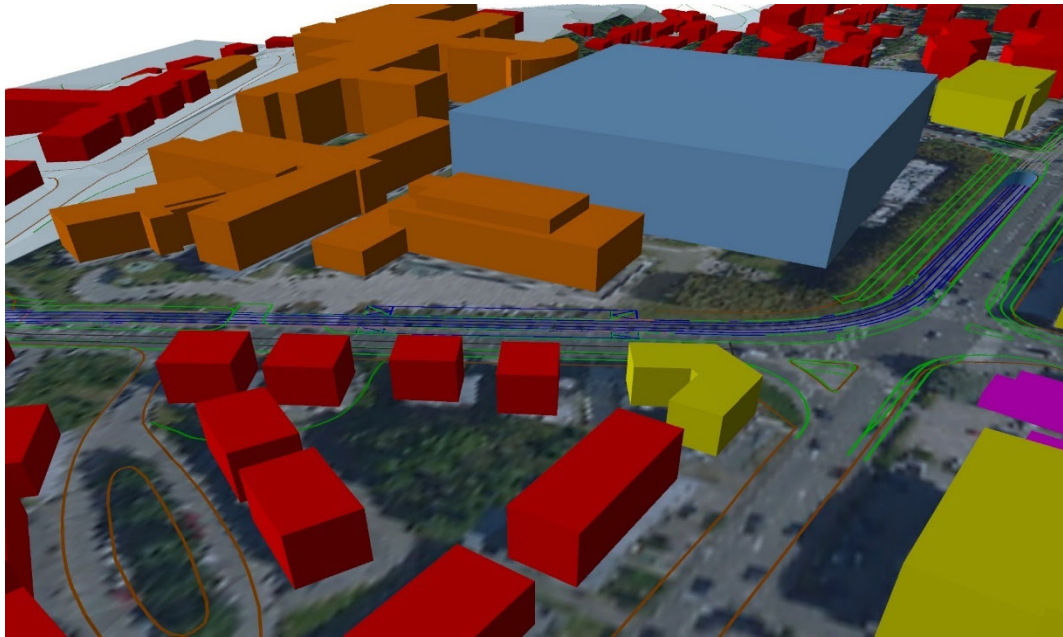


Figure 27 : Vue 3D de la maquette en situation future : zone du CHL

#### 7.4 Méthode de calcul utilisée

Les calculs sont effectués avec le logiciel IMMI Premium-2024 suivant les prescriptions de la « Sechzehnte Verordnung Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verkehrslärmschutzverordnung – 16. BImSchV) », référant les méthodes de calcul SCHALL-03 pour les tramways et RLS-19 pour le trafic routier.

L'utilisation de la méthode RLS-19 diffère de celle employée dans l'étude initiale (RLS-90). L'étude d'incidences initiale reprenait toutes les hypothèses et règlements d'application à cette époque. Cependant, depuis mars 2023, la méthode de calcul pour les routes a changé de la RLS-90 à la RLS-19. Une remarque a été formulée afin de clarifier l'impact limité de cette modification. Afin d'éviter toute question et de pouvoir quantifier précisément la modification, les calculs de cette analyse complémentaire ont été réalisés selon la norme RLS-19.

#### 7.5 Détermination des incidences

Pour ce qui concerne les incidences de l'exploitation du projet, le Grand-Duché du Luxembourg considère l'application des critères de la norme allemande 16. BIm Sch V. Cette norme précise les valeurs limites à ne pas dépasser pour les indicateurs  $L_{\text{Tag}}$  (06-22H) et  $L_{\text{Nacht}}$  (22-06H) suivant l'affectation des zones où les habitations sont situées :

Tableau 13 : Objectifs pour l'exploitation suivant la norme 16. BIm Sch V

Verkehrslärmschutzverordnung - 16. BImSchV			
	dB(A)		
	Tag	Nacht	
1. an Krankenhäusern, Schulen, Kurheimen und Altenheimen	57	47	1. Hôpitaux, Ecoles, Maisons de cures et Séniories
2. in reinen und allgemeinen Wohngebieten & Kleinsiedlungsgebieten	59	49	2. zones résidentielles pures et générales, petites agglomérations
3. in Kerngebieten, Dorfgebieten und Mischgebieten	64	54	3. Zones centre ville, zones villageoises et mixtes
4. in Gewerbegebieten	69	59	4. Zones d'activités

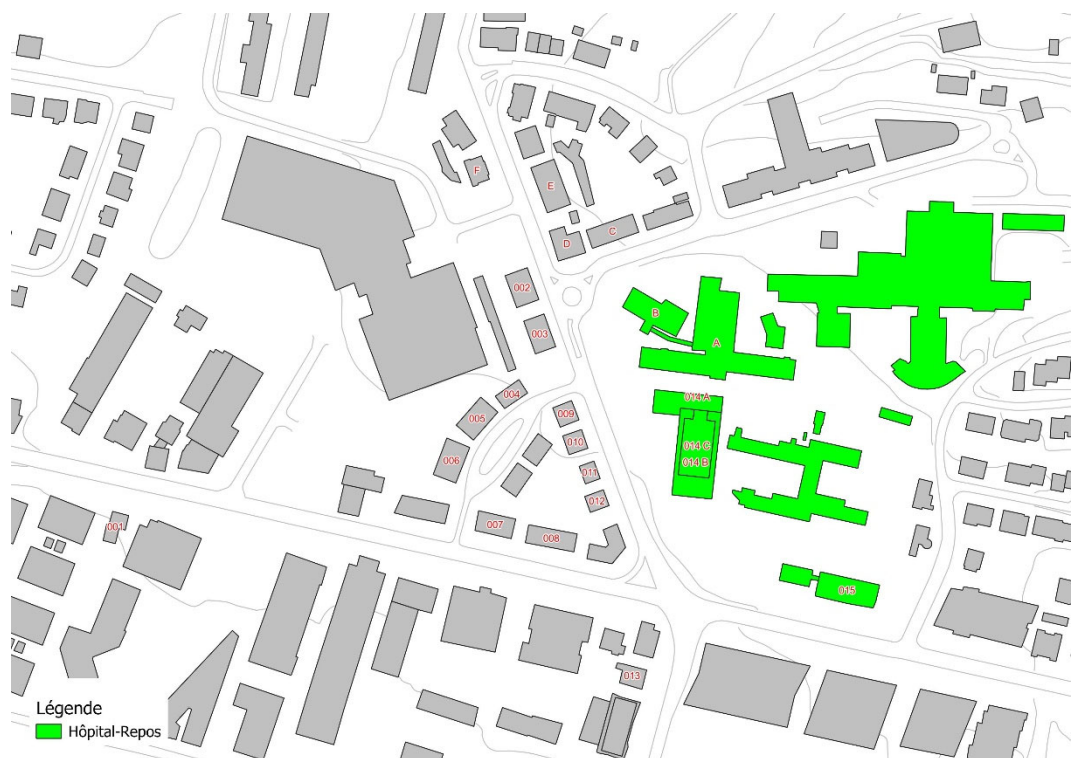


### 7.5.1 Affectation des bâtiments

Les affectations selon le PAG de la Ville de Luxembourg sont reprises au Tableau 14 qui reprend, par groupe de bâtiments / points d'immission étudiés :

- Le numéro des bâtiments / points d'immission correspondant ;
- Leur implantation (zone) au sein de la ville de Luxembourg ;
- Leur affectation suivant le PAG ;
- Le type de zone correspondant à leur exposition / affectation / localisation, selon la norme 16. BImSchV d'application pour la phase d'exploitation ;
- La dernière colonne reprend le type de zone correspondant à leur exposition / affectation / localisation, selon le règlement grand-ducal concernant les bruits de chantiers qui est, lui, d'application pour la phase chantier.

Les figures ci-après présentent la localisation des différents bâtiments autour de la rue Federspiel.



**Figure 28 : Localisation des bâtiments – Situation actuelle**





**Figure 29 : Localisation des bâtiments – Situation future**

**Remarque :**

L'affectation des bâtiments à une zone particulière d'habitat (suivant le Tableau 29), doit être faite en fonction d'une évaluation combinant les affectations du PAG avec l'environnement sonore existant : ainsi, les hôpitaux ou maisons de repos ne sont pas systématiquement affectés par défaut aux critères les plus sévères, mais bien aux critères des zones dans lesquelles ils sont effectivement situés par leur exposition effective existante.

**Tableau 14 : Description des points d'immission : affectations, types, exposition et zones considérées**

Bâtiment	Zone	Affectation PAG	Description	(Zone) (16.BlmSchV)	Zone Règlement GD 13-02-1979
1	Route d'Arlon	Zone spéciale "Administration"	Centre urbain	(3)	V
2 et 3	Rue P. Federspiel	Zone d'habitation 2	Centre urbain	(3)	V
4 à 6	Rue F. Mertens	Zone d'habitation 2	Centre urbain	(3)	V
7 et 8	Route d'Arlon	Zone mixte urbaine	Centre urbain	(3)	V
9 à 12	Rue P. Federspiel	Zone d'habitation 2	Centre urbain	(3)	V
13	Route d'Arlon	Zone mixte urbaine	Centre urbain	(3)	V
14 et 15	Route d'Arlon	Zone de bâtiments et équipements publics	Centre urbain	(3)	V
A et B	Rue P. Federspiel	Zone de bâtiments et équipements publics	Centre urbain	(3)	V
C à F	Rue P. Federspiel	Zone d'habitation 2	Centre urbain	(3)	V

L'affectation de la zone a été faite sur base de la campagne de mesure de bruit qui y a été réalisée : le point de mesure 6 se trouvait juste en face de l'hôpital CHL (2, rue P. Federspiel). Les niveaux mesurés étaient  $L_{DEN} = 66.6$  dB(A),  $L_{night} = 58.3$  dB(A),  $L_{Tag} = 64.4$  dB(A) et  $L_{Nacht} = 57.1$  dB(A) : ces niveaux correspondent bien aux objectifs de la « zone 3 » de la 16. Blm Sch V.

Cependant, le point de mesure n°6 n'est peut-être pas représentatif de la totalité de la zone : afin d'en compléter l'analyse, les cartes stratégiques de bruit ont également été consultées.

Les figures ci-après présentent les cartes de bruit routier des agglomérations de l'année 2021 en niveau  $L_{DEN}$  et  $L_{night}$ .

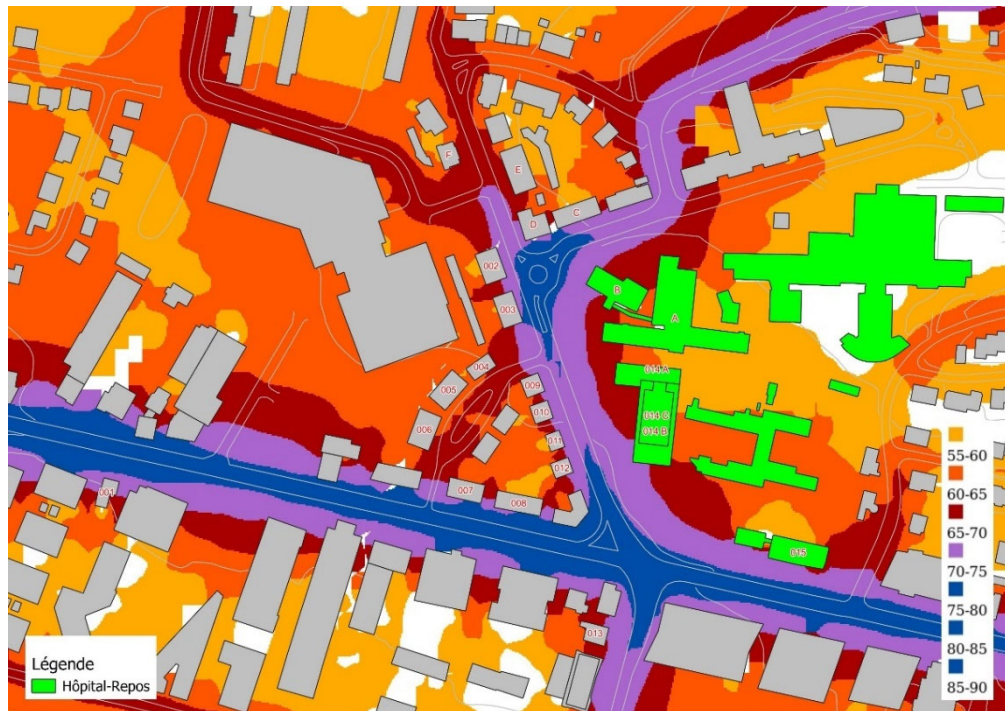


Figure 30 : Carte de bruit stratégique – Routes d'agglomération 2021 –  $L_{DEN}$  en dB(A)<sup>1</sup>

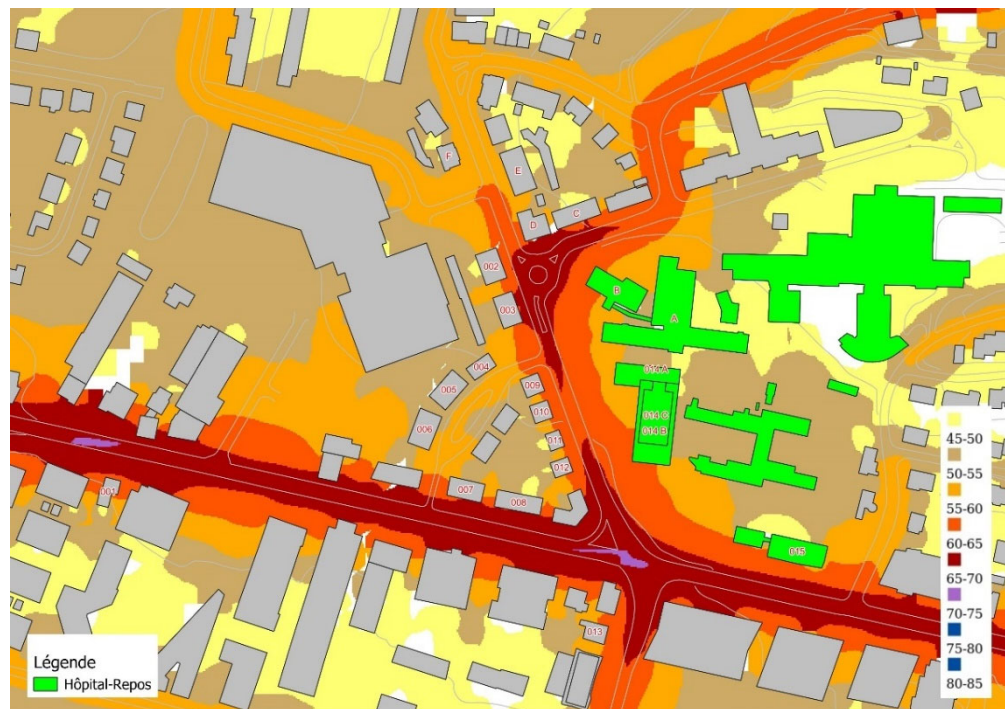


Figure 31 : Carte de bruit stratégique – Routes d'agglomération 2021 –  $L_{night}$  en dB(A)<sup>14</sup>

Les cartes de bruit stratégiques confirment bien les niveaux  $L_{DEN}$  et  $L_{night}$  mesurés au point 6 en face de l'hôpital (bâtiment 14B) ; elles montrent également l'importance du trafic routier dans la rue Federspiel, celle-ci étant utilisée comme un axe de connexion/transit entre la route d'Arlon au Sud et la rue de Rollingerggrund au Nord.

Les bâtiments le long cet axe sont exposés à des niveaux  $L_{DEN}$  de 70 à 75 dB(A) ou des niveaux  $L_{night}$  de 60 à 65 dB(A). Pour les bâtiments plus en arrière (bâtiments 4 à 6, E et F), les niveaux sont moins importants mais ils atteignent encore 65 dB(A) en  $L_{DEN}$  et 55 dB(A) en  $L_{night}$ . L'affectation d'une « zone 3 » selon la 16. Blm Sch V est donc bien justifiée.

<sup>1</sup> Géoportail.lu

### 7.5.2 Incidences

Comme indiqué en 7.5.1 ci-dessus, tous les bâtiments concernés sont actuellement exposés à des niveaux correspondants à la zone 3 de la norme 16. BImSchV : les objectifs correspondants resteront donc bien  $L_{\text{Tag}} (06-22\text{H}) \leq 64 \text{ dB(A)}$  et  $L_{\text{Nacht}} (22-06\text{H}) \leq 54 \text{ dB(A)}$  sur l'ensemble du site étudié.

Ces objectifs sont d'abord appliqués sur le **bruit spécifiquement induit par les tramways**.

D'autre part, le projet correspond à une *modification des infrastructures de transports existantes* : il est reconnu qu'en cas de *modification* d'infrastructures de transports, les incidences d'un nouveau projet qui ne conduiraient pas à une augmentation de bruit *global* de plus de 2 dB(A) sont acceptées en ce sens qu'elles ne seront pas vraiment perceptibles (l'être humain ne peut en effet remarquer une telle variation).

La méthodologie utilisée dans le processus d'établissement des incidences du projet est présentée suivant l'organigramme décisionnel présenté à la Figure 32 ci-dessous.

Le processus d'analyse se déroule selon les phases successives suivantes :

- En fonction du type de bâtiment, les critères ( $L_{\text{Tag}} \leq 64 \text{ dB(A)}$  et  $L_{\text{Nacht}} \leq 54 \text{ dB(A)}$ ) sont d'abord considérés pour ce qui concerne **bruit spécifiquement induit par les tramways** ;
- Si ces critères sont respectés, le projet sera conforme aux prescriptions ;
- Si ces critères sont dépassés, une deuxième analyse sera alors portée sur la modification du paysage sonore induite par la mise en exploitation du tram :
  - Si cette modification reste inférieure ou égale à 2 dB(A), elle ne sera pas perceptible, et donc considérée comme acceptable ;
  - Si la modification induit une augmentation des niveaux de bruit actuels de plus de 2 dB(A), alors il conviendra d'étudier les meilleurs moyens pratiquement possibles pour contenir cette augmentation afin de rendre l'exploitation du tram mieux compatible avec son environnement.

C'est selon ce processus que seront déterminées les incidences et, le cas échéant, les dispositions proposées afin de les contenir.

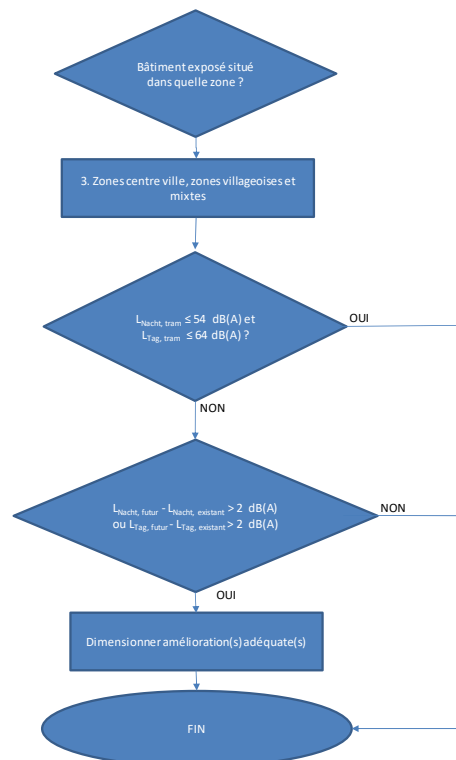


Figure 32 : Détermination des incidences du tram : organigramme décisionnel

## 7.6 Présentation des résultats

La localisation et la numérotation des bâtiments au droit desquels les calculs en façade ont été détaillés est reprise aux figures 28 et 29 ci-avant.

Pour chacun des situations étudiées, les résultats ( $L_{\text{Tag}}$  et  $L_{\text{Nacht}}$ ) sont présentés sous forme tabulaire reprenant les valeurs calculées. Comme les calculs ont été faits à toutes les façades et à tous les étages d'un échantillon représentatif de 21 bâtiments (numérotés de 1 à 15 et de A à F), leur présentation en serait ici fastidieuse ; ainsi, les résultats présentés ici sont-ils limités, pour chaque bâtiment, à la valeur maximale relevée sur l'ensemble de ses façades et à son étage le plus exposé, soit donc la partie la plus exposée du bâtiment.

## 7.7 Analyse des résultats

Les résultats sont présentés de façon détaillée en plusieurs tableaux pour les situations actuelle, de référence et projetée. Les tableaux 15 à 17 présentent les résultats pour l'ensemble des bâtiments, le tableau 18 en présente les résultats de façon synthétique (résultats limités aux *seuls points pour lesquels les critères en niveaux  $L_{\text{Tag}}$  et  $L_{\text{Nacht}}$  seraient atteints ou dépassés*).

Tous les tableaux de résultats reprennent :

- La situation du point (numéro du bâtiment / point) et le critère à respecter,
- Les résultats  $L_{\text{Tag}}$  et  $L_{\text{Nacht}}$  pour les situations actuelles, de référence et le projet.

L'utilisation de couleurs facilite l'analyse des tableaux :

- Toutes les valeurs respectant les critères sont reprises en caractères de couleur noire ;
- Les valeurs dépassant les critères sont reprises en caractères de couleur **rouge**.

**Tableau 15 : Niveaux spécifiquement induits par les trams**

Niveaux spécifiques induits uniquement par les trams [dB(A) réf.20μPa]									
Critère		N°	Actuelle		Référence		N°	Projetée	
			Ligne T1					Ligne T1 + projet	
Tag	Nacht		Tag	Nacht	Tag	Nacht		Tag	Nacht
64	54	1	15	7	16	9	1	42	36
64	54	2	19	11	20	13	2	61	55
64	54	3	18	10	19	12	3	49	43
64	54	4	19	11	20	13	4	48	42
64	54	5	18	10	19	12	5	47	41
64	54	6	17	9	18	11	6	45	39
64	54	7	19	12	20	13	7	40	34
64	54	8	20	12	21	14	8	42	36
64	54	9	18	10	19	12	9	46	40
64	54	10	18	10	19	12	10	45	39
64	54	11	18	11	20	13	11	45	39
64	54	12	18	11	19	12	12	46	40
64	54	13	17	9	18	11	13	40	34
64	54	14A	20	12	21	14	14A	45	39
64	54	14B	19	11	20	13	14B	49	43
64	54	14C	20	12	21	14	14C	45	39
64	54	15	19	11	20	13	15	50	44
64	54	A	21	13	22	15	A	46	40
64	54	B	13	6	15	8	B	47	41
64	54	C	18	10	19	12	C	43	37
64	54	D	19	11	20	13	D	59	53
64	54	E	19	11	20	13	E	55	49
64	54	F	17	10	19	12	F	55	49



**Tableau 16 : Niveaux spécifiques induits par la route**

			Niveaux spécifiques induits uniquement par la route [dB(A) réf.20μPa]						
Critère		N°	Actuelle		Référence		N°	Projetée	
			Route					Route	
			Tag	Nacht	Tag	Nacht		Tag	Nacht
64	54	1	68	59	68	59	1	68	59
64	54	2	57	48	57	48	2	56	47
64	54	3	62	53	62	53	3	62	53
64	54	4	61	52	61	52	4	61	52
64	54	5	58	49	58	49	5	58	49
64	54	6	63	54	63	54	6	63	54
64	54	7	70	61	70	61	7	70	61
64	54	8	70	61	70	61	8	70	61
64	54	9	67	58	67	58	9	67	58
64	54	10	67	58	67	58	10	67	58
64	54	11	67	58	67	58	11	67	58
64	54	12	67	58	67	58	12	67	58
64	54	13	66	57	66	57	13	66	57
64	54	14A	63	54	63	54	14A	64	55
64	54	14B	65	56	65	56	14B	65	57
64	54	14C	62	53	62	53	14C	63	54
64	54	15	67	58	67	58	15	66	57
64	54	A	63	54	63	54	A	63	55
64	54	B	62	53	62	53	B	62	53
64	54	C	56	47	56	47	C	56	47
64	54	D	57	48	57	48	D	57	48
64	54	E	54	45	54	45	E	54	45
64	54	F	53	44	53	44	F	53	44

**Tableau 17 : Niveaux spécifiques induits par les trams + route**

		Niveaux globaux (route + tram) [dB(A) réf.20μPa]							
Critère		N°	Actuelle		Référence		N°	Projetée	
			Route + Tram (Ligne T1)					Route + Tram (Ligne T1 + projet)	
Tag	Nacht		Tag	Nacht	Tag	Nacht		Tag	Nacht
64	54	1	68	59	68	59	1	68	59
64	54	2	57	48	57	48	2	62	55
64	54	3	62	53	62	53	3	62	54
64	54	4	61	52	61	52	4	61	52
64	54	5	58	49	58	49	5	58	50
64	54	6	63	54	63	54	6	63	54
64	54	7	70	61	70	61	7	70	61
64	54	8	70	61	70	61	8	70	61
64	54	9	67	58	67	58	9	67	58
64	54	10	67	58	67	58	10	67	58
64	54	11	67	58	67	58	11	67	58
64	54	12	67	58	67	58	12	67	58
64	54	13	66	57	66	57	13	66	57
64	54	14A	63	54	63	54	14A	64	55
64	54	14B	65	56	65	56	14B	66	57
64	54	14C	62	53	62	53	14C	63	54
64	54	15	67	58	67	58	15	66	57
64	54	A	63	54	63	54	A	64	55
64	54	B	62	53	62	53	B	62	53
64	54	C	56	47	56	47	C	56	47
64	54	D	57	48	57	48	D	61	54
64	54	E	54	45	54	45	E	58	50
64	54	F	53	44	53	44	F	57	50

**Tableau 18 : Résultats synthétiques des incidences de l'exploitation du projet**

Niveaux spécifiques induits uniquement par les trams [dB(A) réf.20µPa]									
Situation		N°	Actuelle		Référence		Projetée		N°
Critère			Ligne T1				Ligne T1 + projet		
Tag	Nacht		Tag	Nacht	Tag	Nacht	Tag	Nacht	
64	54	2	19	11	20	13	61	55	

Projetée			N°
Dépassement du critère [dB(A) réf.20µPa]			
Tag	Nacht		
	1		
2			

Niveaux globaux (route + tram) [dB(A) réf.20µPa]									
Situation		N°	Actuelle		Référence		Projetée		N°
Critère			Route + Tram (Ligne T1)				Route + Tram (Ligne T1 + projet)		
Tag	Nacht		Tag	Nacht	Tag	Nacht	Tag	Nacht	
64	54	2	57	48	57	48	62	55	

Projetée			N°
Incidences induites par le projet (projet-référence) [dB(A) réf.20µPa]			
Tag	Nacht		
	7		
2			

Le Tableau 18 reprend l'unique point auquel des dépassements de critères induits par le projet sont attendus : c'est le point N°2.

Au point 2, les critères de jour sont respectés alors que les critères de nuit sont dépassés de 1 dB(A). Cependant, vu son écartement par rapport aux axes routiers principaux, l'exposition actuelle y est nettement plus faible : ainsi, même si les niveaux de bruit du projet [ $L_{Nacht} = 55$  dB(A)] y dépassent de 1 dB le critère de 54 dB(A), le projet va, lui, y augmenter fortement le niveau de bruit par rapport à la situation actuelle (+7 dB) et il serait raisonnable d'en limiter l'impact spécifique.

*Remarque :*

*Les bâtiments 14, 15, A et B représentent les bâtiments de l'hôpital CHL.*

*Les niveaux induits par le projet du tram y varient entre 45 et 50 dB(A) en période de jour ( $L_{Tag}$ ) et entre 39 et 44 dB(A) en période de nuit ( $L_{Nacht}$ ). Les critères de la « zone 3 » (64 et 54dB(A)) sont donc bien respectés.*

*Par ailleurs, il convient de souligner que, même si y on applique les critères environnementaux applicables à la « zone 1 » (Hôpitaux, Ecoles, Maisons de cures et Séniories), ceux-ci seraient également bien respectés.*

## 7.8 Conclusions et recommandations

La zone autour de la Rue Pierre Federspiel va être exposée à des niveaux de bruit supérieurs aux niveaux actuels, tout en y restant assez raisonnables [ $L_{\text{Tag}}$  (06-22H) = 62 dB(A) et  $L_{\text{Nacht}}$  (22-06H) = 55 dB(A)] : l'utilisation de graisseurs de voies dans les parties courbes pourraient être envisagés. S'il persistait encore des dépassements après la mise en service du tram, des mesures spécifiques additionnelles pourront y être appliqués.

*Rappel important :*

*L'utilisation d'un tram de 56 m de long à la place de 45m, va augmenter les niveaux de bruit d'1 dB(A) : le point 2 reste le seul point où des dépassements induits par le projet sont constatés.*

**Tableau 19 : Résultats synthétiques des incidences de l'exploitation du projet avec un tram de 56 m de long**

Niveaux spécifiques induits uniquement par les trams [dB(A) réf.20μPa]									
Situation		N°	Actuelle		Référence		Projetée		
Critère			Ligne T1				Ligne T1 + projet		
Tag	Nacht		Tag	Nacht	Tag	Nacht	Tag	Nacht	
64	54	2	19	11	20	13	62	56	

Niveaux globaux (route + tram) [dB(A) réf.20μPa]									
Situation		N°	Actuelle		Référence		Projetée		
Critère			Route + Tram (Ligne T1)				Route + Tram (Ligne T1 + projet)		
Tag	Nacht		Tag	Nacht	Tag	Nacht	Tag	Nacht	
64	54	2	57	48	57	48	63	56	

Projetée									
N°	Dépassement du critère [dB(A) réf.20μPa]								
	Tag				Nacht				
2					2				

Projetée									
N°	Incidences induites par le projet (projet-référence) [dB(A) réf.20μPa]								
	Tag				Nacht				
2					8				

Enfin, ces conclusions sont basées sur des hypothèses de trafics routiers et de bus inchangées par rapport à la situation actuelle telle que modélisée : il semble cependant évident que ces trafics vont diminuer à la suite de la mise en service du tram, ce qui pourrait, encore une fois, amener à des réductions de bruit significatives sur ces trafics (route et bus) et, **vraisemblablement, à un impact global du projet positif.**

## 8. ANNEXES



### 8.1 Liste du matériel de mesure

Le tableau suivant liste le matériel utilisé pour la campagne d'essai.

Material	Manufacturer	Type	Serial Number
Acquisition system	B&K	LAN-XI	3050-100292
Hammer	DYTRAN	5803A	1711
Accelerometers	PCB	393A03	73739 / 73740 / 40442
	PCB	603C01	LW438344
	DYTRAN	3056B1	22740
Vibration calibrator	B&K	4294	2951549

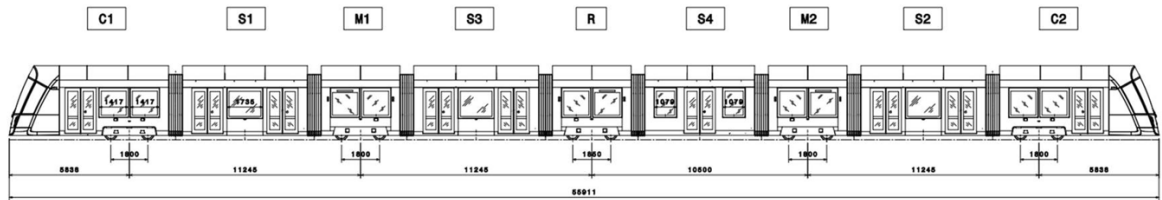
Tableau 20 : Liste du matériel utilisé

## 8.2 Terme source : Données d'entrée pour le calcul

Le terme source est obtenu à l'aide du logiciel GroundVib développé en 2000 par Vibratex dans le cadre d'un projet de recherche européen et validé au travers de nombreux projets.

Le matériel roulant utilisé pour les calculs est le tramway Urbos 100 de CAF.

Ce tramway est constitué de 4 caisses munies de bogie et de 3 caisses « suspendues », similaire au tramway de Saragosse avec une 1 caisse bogie et 1 caisse « suspendue » en plus.



Les paramètres mécaniques des tramway CAF URBOS nécessaires au calcul sont issus de la base de données Vibratex :

EXCEPTIONAL LOAD (EL8)		C1	S1	M1	S3	R	S4	M2	S2	C2
Car body mass [kg]	$m_c$	13568	13224	7173	14294	7500	14294	7173	13224	13568
Car body pitch inertia [kg.m <sup>2</sup> ]	$I_c$	60300	58400	14200	64100	19300	64100	14200	58400	60300
Bogie mass [kg]	$m_b$	3370		3370		1462		3370		3370
Bogie pitch inertia [kg.m <sup>2</sup> ]	$I_b$	1183		1183		429		1183		1183
Unsprung wheelset mass [kg]	$m_w$	695		695		826		695		695
Primary suspension stiffness [MN/m]	$k_1$	5.886		5.886		5.886		5.886		5.886
Primary suspension viscous damping [kNs/m]	$c_1$	0		0		0		0		0
Secondary suspension stiffness [MN/m]	$k_2$	3.644		3.928		3.928		3.928		3.644
Secondary suspension viscous damping [kNs/m]	$c_2$	85		85		42.5		85		85
Axle spacing [m]	$L_a$	1.8		1.8		1.85		1.8		1.8

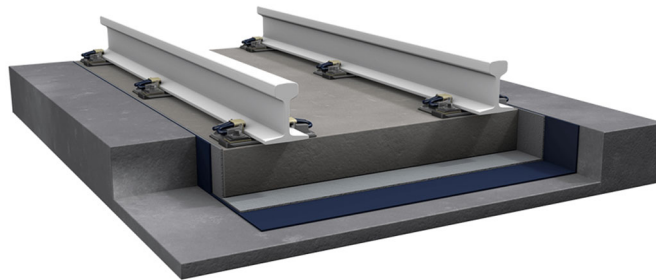
Bogie spacing [m]	$I_b$	11.245
-------------------	-------	--------

**Caractéristiques des poses de voie :**

		Standard	-8dB	-20dB
<b>Semelle sous rail</b>	Raideur [kN/mm]	150	50	150
	Facteur d'amortissement (C/Ccrit)	0.3	0.3	0.3
<b>Couche résiliente sous dalle</b>	Raideur surfacique [MN/m <sup>3</sup> ]	-	-	19
	Facteur d'amortissement (C/Ccrit)	-	-	0.3



Exemple de pose avec semelle sous rail



Exemple de pose avec couche résiliente sous dalle

Une pose -8 dB correspond à une pose qui atténue les vibrations de -8 dB à partir du 1/3 d'octave 63 Hz par rapport à la pose standard.

Une pose -20 dB correspond à une pose qui atténue les vibrations de -20 dB à partir du 1/3 d'octave 63 Hz par rapport à la pose standard.

Les gains par insertion, par rapport à la pose standard, des poses considérées pour les simulations sont affichés en Figure 33.

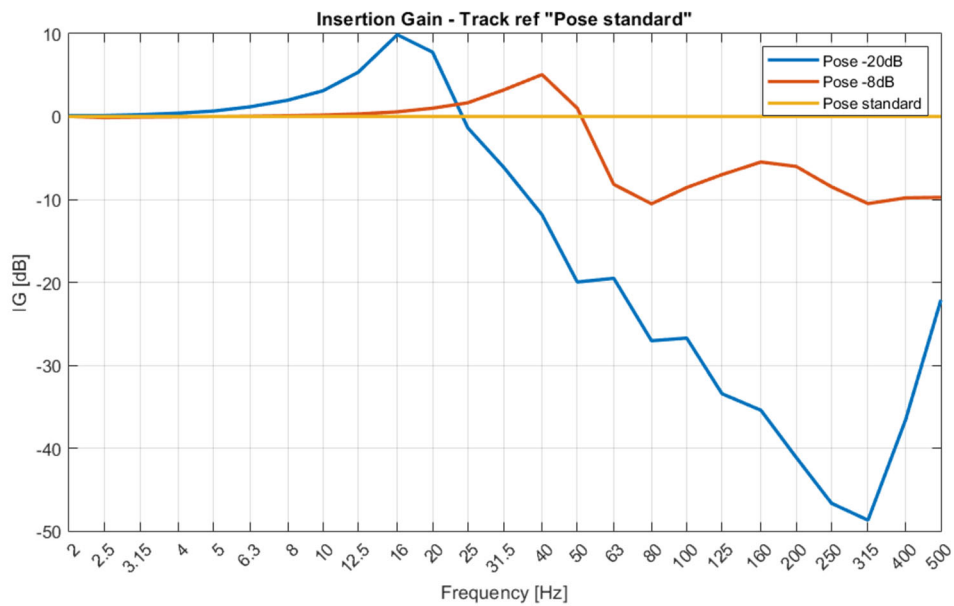


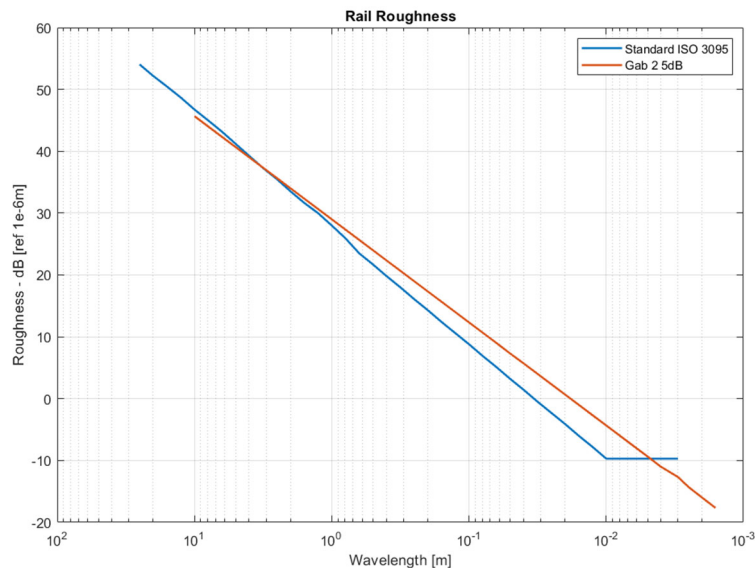
Figure 33 : Gain par insertion, par rapport à la pose standard, des poses de voies considérées pour les simulations

### Rugosité :

La source d'excitation est la rugosité de l'interface roue rail, représentée par un spectre RMS.

Le spectre Gab2 + 5dB issu du retour d'expérience de notre partenaire Vibratex, couvrant la plupart des applications tramway en exploitation, est utilisé.

Celui-ci est comparé ci-dessous à titre d'information au spectre de rugosité ISO 3095 représentant un réseau en bon état :





### 8.3 Terme propagatif : Transfert sol

Les transferts vibratoires sol sont obtenus à l'aide du logiciel Mefissto développé par le CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment). La modélisation est de type 2.5D permettant de traiter le cas des environnement 2D (invariance des géométries suivant l'axe de la voie) soumis à des sollicitations 3D (sollicitations par les différents contacts roue/rail le long du tram), comme c'est le cas pour les sollicitations de type ferroviaire.

Les caractéristiques du sol sont extraites du rapport géotechnique. Les caractéristiques du sol issus des carottages étant variables sur une même zone, certaines hypothèses simplificatrices doivent être faites afin de réduire la problématique à celle d'un sol constitué de quelques couches. Des variations paramétriques sont menées afin de vérifier que les variations des valeurs de paramètres observées sur site ne modifient pas les conclusions de l'étude.

#### Zone tranchée couverte :

Les caractéristiques de la tranchée sont extraites des données d'entrée :

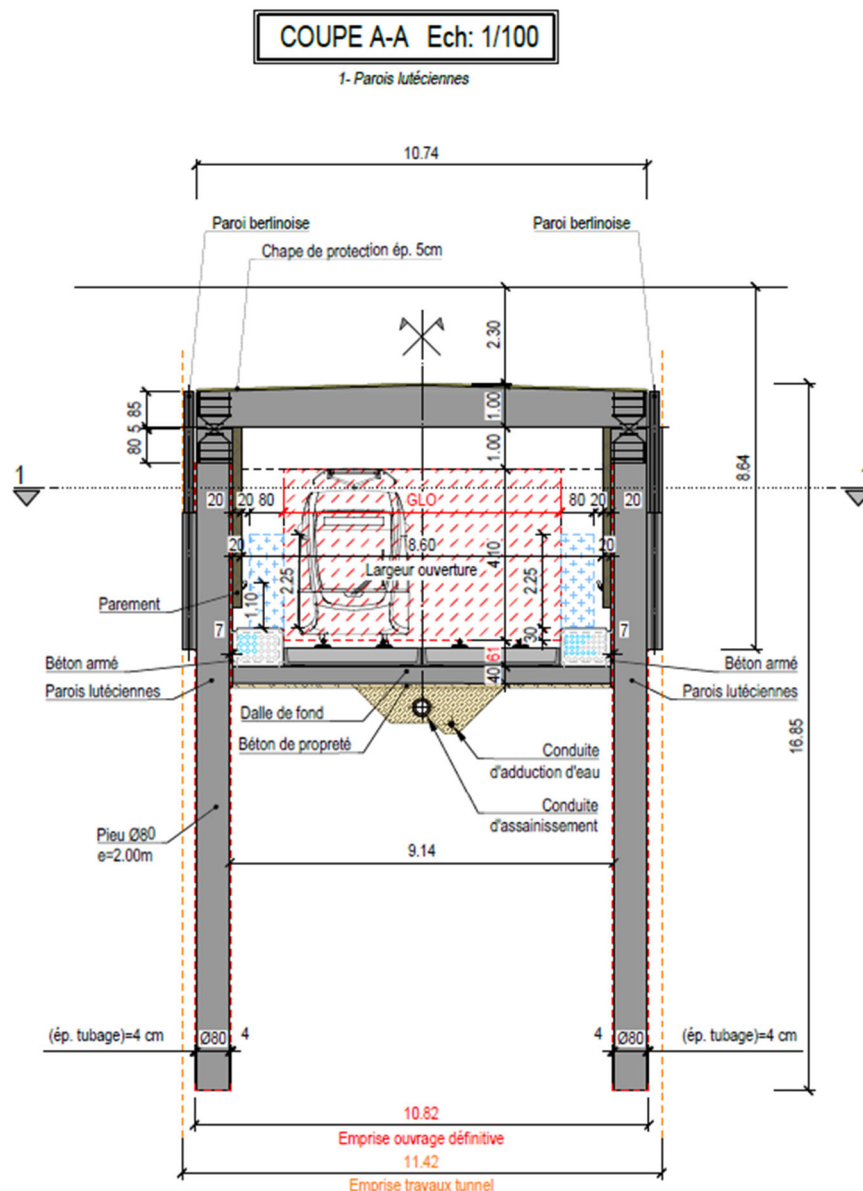
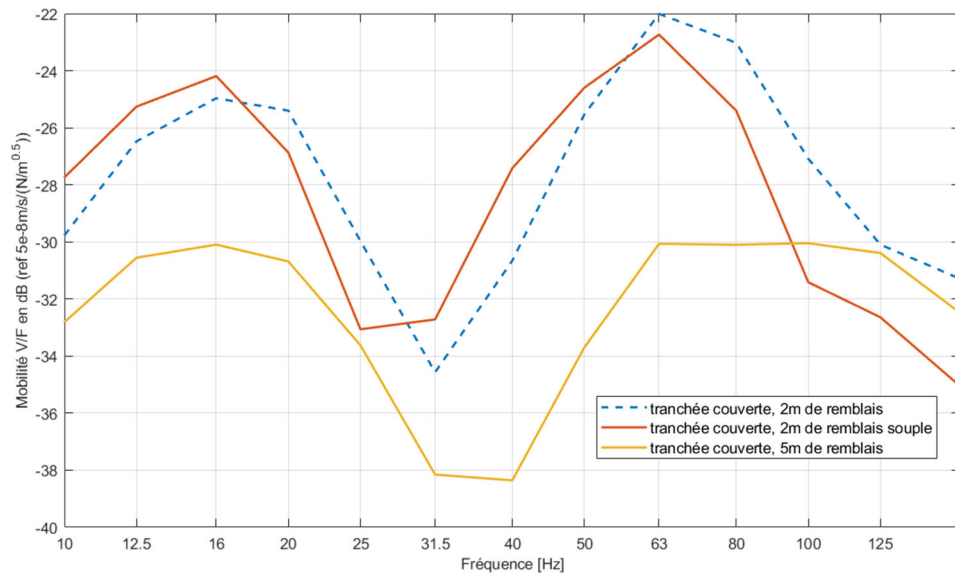


Figure 34 : Caractéristiques de la tranchée couverte

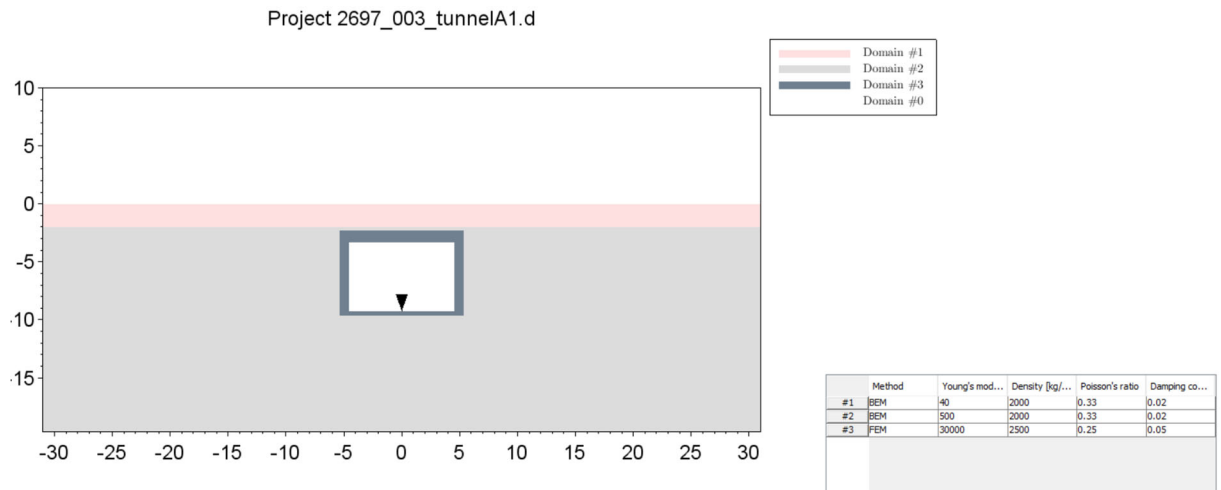
Les transferts de 3 configurations de sols identifiées sur la zone tranchée couverte sont affichés :



**Figure 35 : Mobilité de transfert linéique simulation Mefisto, zone tranchée couverte**

Le transfert épaisseur 2m de remblais est finalement utilisé pour les calculs, celui-ci est conservatif et permet de couvrir le reste des configurations.

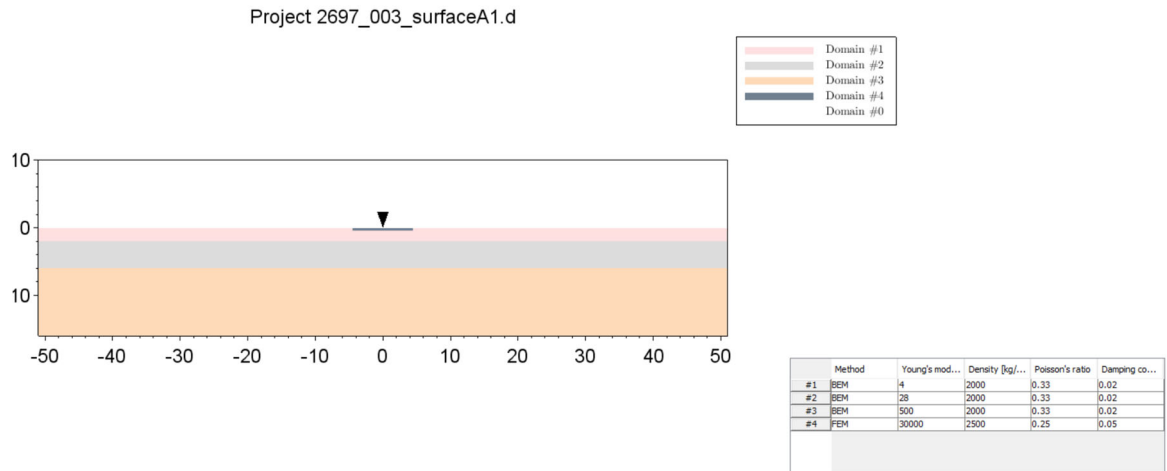
La coupe 2D de la modélisation est affichée en Figure 36



**Figure 36 : Coupe 2D de la modélisation Mefisto, configuration tranchée couverte avec les paramètres des couches de sol**

### Zone surface (Hôpital et Stade) :

De la même manière la dalle de fondation de la voie est modélisée sur un sol multicouche, dans Mefissto, dont les caractéristiques sont extraites du rapport géotechnique.



**Figure 37 : Coupe 2D de la modélisation Mefissto, configuration surface**