LUXTRAM
Tramway de Luxembourg

Tronçon Arlon
Variante Mixte

Etude des incidences acoustiques et vibratoires du chantier
Avant-Projet Détaillé (APD)

8 mai 2025

Acoustic Technologies srl - Rue Antoine de Saint-Exupéry 2, B-6041 Gosselies
Tél +32 (0)2 344 85 85 - TVA BE 0774.842.334
mail@atech-acoustictechnologies.com - ***www.atech-acoustictechnologies.com***

TABLE DES MATIERES

1. INTRODUCTION 6

1.1 Objet de l'étude 6

1.2 Description de l'environnement sonore existant 7

1.3 Description du projet 9

1.4 Méthodologie retenue 10

2. ETUDES DES INCIDENCES ACOUSTIQUES DU CHANTIER 11

2.1 Méthodologie générale 11

2.2 Données 11

2.3 Méthodes de calcul utilisées 14

2.4 Détermination des incidences 15

2.4.1 Affectation des bâtiments 16

2.5 Présentation des résultats 17

2.6 Analyse des résultats 17

2.6.1 Section 1 – Tramway en surface 18

2.6.2 Section 2 – Tramway en surface 18

2.6.3 Section 3 – Tramway en surface 19

2.6.4 Section 4 – Tramway en surface 20

2.6.5 Section 5 – Nouvelle rue d'Ostende – Tramway en surface 21

2.6.6 Section 5 – Ancienne rue d'Ostende – Tramway en surface 21

2.6.7 Trémie tranché couverte 22

2.6.7.1 Section 6 22

2.6.7.2 Section 7 23

2.6.7.3 Section 8 24

2.6.7.4 Section 9 25

2.6.7.5 Section 10 26

2.6.7.6 Section 11 27

2.6.7.7 Section 12 28

2.6.8 Section 13 – Tramway en surface 30

2.6.9 Section 14 – Tramway en surface 31

2.6.10 Section 15 – Tramway en surface 32

2.7 Recommandations 33

2.8 Conclusions 33

3. ETUDES DES INCIDENCES VIBRATOIRES DU CHANTIER 34
3.1 Rappel sur les nuisances vibratoires 34
3.2 Contexte règlementaire et normatif 35
3.3 Modélisation de l'impact vibratoire en phase travaux 38
3.3.1 Méthodologie 38
3.3.1.1 Terme source 38
3.3.1.2 Terme propagatif 39
3.3.1.3 Terme immission 39
3.3.2 Identification des opérations à risque 40
3.3.2.1 Configuration surface 40
3.3.2.2 Configuration tranchée couverte 41
3.3.3 Résultats 43
3.3.3.1 Zone en surface 43
3.3.3.2 Zone en tranchée couverte 48
3.4 Conclusions 51
4. ANNEXES 53
4.1 Localisation et numérotation des bâtiments étudiés 53
4.2 Localisation des sections de chantier 56
4.3 Déroulement des travaux 59
4.4 Planning Provisoire des Travaux 75
4.5 Planning Chemin de Fer 76
4.6 Terme propagatif : transfert sol 77
4.7 Terme immission : établissement d'un transfert bâtiment moyen 79
4.8 Lexique 80

LISTE DES FIGURES

Figure 1 – Vue aérienne du tronçon « Arlon » (Route d'Arlon) 7
Figure 2 – Plan Général d'Aménagement (PAG) 8
Figure 3 – Localisation du projet et zone d'étude : 9
Figure 4 : Planning provisoire des travaux et Planning chemin de fer 13
Figure 5 : Génération et propagation des vibrations au passage d'un matériel roulant 34
Figure 6 : Génération et propagation des vibrations lors d'opérations de travaux 34
Figure 7 : Exemple d'échelle qualitative d'analyse du niveau vibratoire, issu de l'article 35
Figure 8 : Valeurs limites de niveau vibratoire selon l'arrêté du 23 juillet 1986, source continue 36
Figure 9 : Valeurs limites de niveau vibratoire selon l'arrêté du 23 juillet 1986, source impulsionnelle 36
Figure 10 : Source vibratoire des engins de chantier proposé par le guide FTA 38
Figure 11 : Modèle de propagation des vibrations proposé dans le guide FTA 39
Figure 12 : Section de chantier, tronçon Arlon 40
Figure 13 : Configurations critiques, zone surface 40
Figure 14 : Exemple de compacteur à rouleaux vibrants 41
Figure 15 : Configurations critiques, zone tranchée couverte 41
Figure 16 : Zone « voie en surface » - Rue Federspiel 43
Figure 17 :Niveaux vibratoires max (PPV) en fonction de la distance (niveau centre plancher) - Hôpital 44
Figure 18 : Niveaux de pression acoustique (RMS) en fonction de la distance (bruit solidien dans bâtiments) - Hôpital 44
Figure 19 : Zone critique hôpital rue Federspiel 45
Figure 20 : Niveaux vibratoires max (PPV) en fonction de la distance (niveau centre plancher) – Immeuble bas 46
Figure 21 : Niveaux de pression acoustique (RMS) en fonction de la distance (bruit solidien dans bâtiments) – Immeuble bas 46
Figure 22 : Zones critiques immeuble bas d'habitation rue Federspiel 47
Figure 23 : Zone « voie en tranchée couverte », route d'Arlon 48
Figure 24 :Niveaux vibratoires max (PPV) en fonction de la distance (niveau centre plancher) - Hôpital 49
Figure 25 : Niveaux de pression acoustique (RMS) en fonction de la distance (bruit solidien dans bâtiments) - Hôpital 49
Figure 26 : Niveaux vibratoires max (PPV) en fonction de la distance (niveau centre plancher) – Immeuble bas 50
Figure 27 : Niveaux de pression acoustique (RMS) en fonction de la distance (bruit solidien dans bâtiments) – Immeuble bas 50
Figure 28 : Zone critique hôpital rue Federspiel 52
Figure 29 : Zones critiques immeuble bas d'habitation rue Federspiel 52
Figure 30 : Coupe 2D de la modélisation Mefissto, rue Federspiel 73
Figure 31 : Ajustement du modèle de propagation type « FTA », rue Federspiel 73
Figure 32 : Coupe 2D de la modélisation Mefissto, route d'Arlon 74
Figure 33 : Ajustement du modèle de propagation type « FTA », route d'Arlon 74

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : détail des types de travaux par phase 12
Tableau 2 : puissances acoustiques considérées par type d'engin 13
Tableau 3 : recommandations du Règlement concernant les bruits des établissements et des chantiers 15
Tableau 4 : description des points d'immission : affectations, types, exposition et zones considérées 16
Tableau 5 : Résultats pour la Section 1 18
Tableau 6 : Résultats pour la Section 2 18
Tableau 7 : Résultats pour la Section 3 19
Tableau 8 : Résultats pour la Section 4 20
Tableau 9 : Résultats pour la Section 5 – Nouvelle rue d'Ostende 21
Tableau 10 : Résultats pour la Section 5 – Ancienne rue d'Ostende 21
Tableau 11 : Résultats pour la Section 6 22
Tableau 12 : Résultats pour la Section 7 23
Tableau 13 : Résultats pour la Section 8 24
Tableau 14 : Résultats pour la Section 9 25
Tableau 15 : Résultats pour la Section 10 26
Tableau 16 : Résultats pour la Section 11 27
Tableau 17 : Résultats pour la Section 12 28
Tableau 18 : Résultats pour la Section 13 30
Tableau 19 : Résultats pour la Section 14 31
Tableau 20 : Résultats pour la Section 15 32
Tableau 21 : Critères VC pour les équipements sensibles 35
Tableau 22 : Critères VC pour les équipements sensibles, équivalence en dBv réf 5e-8 m/s 36
Tableau 23 : Facteur transfert vibratoire moyen des bâtiments (TF2 + TF3 + émission bruit solidien le cas échéant), confort vibratoire (dBv) et bruit solidien (dBA) 39
Tableau 24 : Niveau seuil bâtiment à 10 m, route d'Arlon 43
Tableau 25 : Niveau seuil bâtiment à 10 m, route d'Arlon 48
Tableau 26 : Niveau maximal à 15 et 20 m de la source, rue Federspiel 51
Tableau 27 : Niveau maximal à 15 et 2 m de la source, route d'Arlon 51
Tableau 28 : Transfert vibratoire moyen des bâtiments (TF2 + TF3 + émission bruit solidien la cas échéant), confort vibratoire et bruit solidien 75

1. INTRODUCTION

1.1 Objet de l'étude

A la demande du bureau Schroeder & Associes, A-Tech a réalisé l'étude des incidences acoustiques et vibratoires actuelles et futures autour du « tronçon Arlon » du projet de Tramway de la Ville de Luxembourg ; ce tronçon sera raccordé au tronçon A du réseau de tramway LUXTRAM.

Cette nouveau tronçon, situé entre le Place de l'Étoile et le pôle d'échange CHL aura une longueur d'environ 2 Km et 4 stations ; depuis la Place de l'Étoile, cette section desservira l'Ouest de la Ville, le quartier Belair, des secteurs en renouvellement urbain, et le Centre Hospitalier (CHL).

La présente étude concerne la "variante mixte" de cette section : entre la Place de l'Étoile et le stade, le tram roule en surface ; à partir du stade, le tram passe en souterrain jusqu'au CHL par un tunnel d'environ 600 m, avant de tourner vers la Rue Federspiel, en y revenant en surface.

La présente étude a pour but :

- D'évaluer les niveaux de bruit et vibrations auxquels les riverains pourraient être soumis lors des différentes phases de chantier, et donc **les incidences spécifiques du chantier** par rapport aux prescriptions du règlement grand-ducal concernant le niveau de bruit dans les alentours immédiats des établissements et des chantiers ;
- Le cas échéant, d'identifier les bâtiments et les zones devant faire l'objet de mesures d'atténuation et de proposer ces mesures.

La structure du rapport apparait clairement à la lecture de la table des matières.

1.2 Description de l'environnement sonore existant

Le tronçon « Arlon » du tramway commence à la place de l'Étoile et suit la Route d'Arlon jusqu'au Centre Hospitalier CHL : cette section a une longueur d'environ 2 km (Figure 1).

La principale source actuelle de bruit est le trafic routier (la route d'Arlon / N6 et les axes qui y sont raccordés): en tant qu'axe pénétrant vers le centre-ville, cette route supporte en effet un important trafic.

Dans une moindre mesure, la ligne de tram existante dans sa partie à proximité directe de la Place de l'Étoile est également une source de bruit au sein de l'environnement sonore actuel.

Figure 1 – Vue aérienne du tronçon « Arlon » (Route d'Arlon)

L'urbanisation le long de cet axe est plus « ouverte » qu'au centre-ville : tout au long de son tracé, elle reprend différents types de bâtiments comme le montre le PAG présenté page suivante à la Figure 2[1] : maisons d'habitation, immeubles de logements, immeubles de bureaux, commerces, le Parking Stade et le Stade Josy Barthel, pour finir vers le Centre Hospitalier.

La Figure 2 reprend les différentes affectations telles qu'actuellement reprises au PAG de la Ville de Luxembourg.

1 ce plan est repris de façon plus détaillée en annexe.

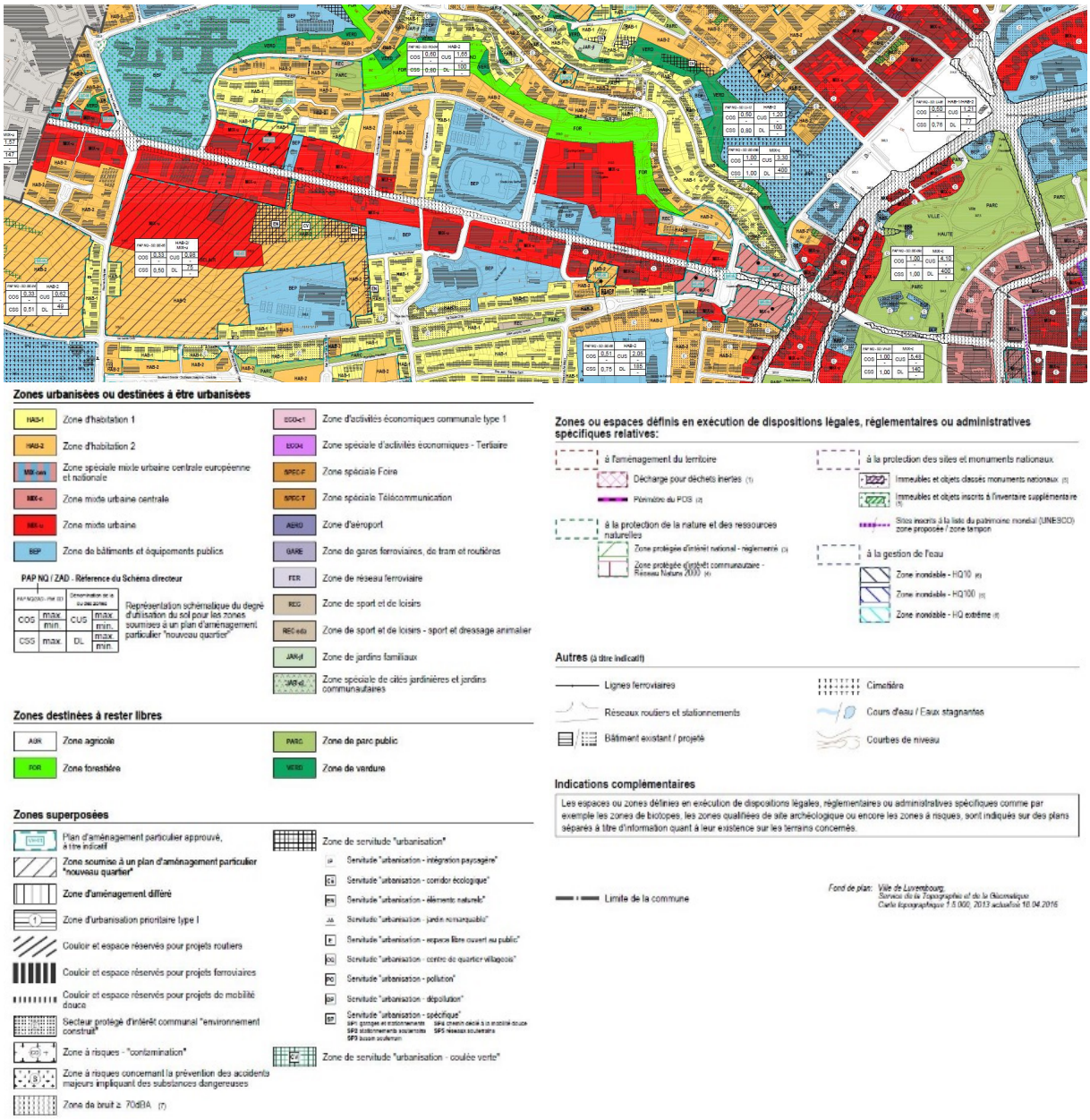


Figure 2 – Plan Général d'Aménagement (PAG)
de la Ville de Luxembourg (2020) le long du tracé du projet LUXTRAM

1.3 Description du projet

La Figure 3 ci-après localise le tracé du projet et la zone d'étude :

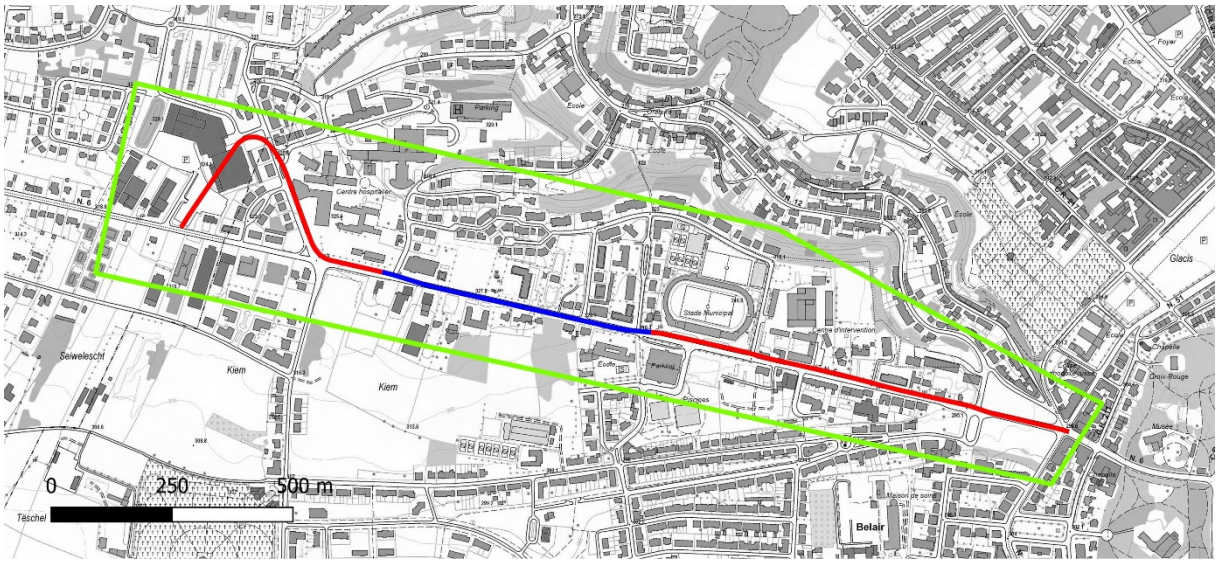


Figure 3 – Localisation du projet et zone d'étude :
en rouge, le tracé du projet LUXTRAM « en surface » ;
en bleu, le tracé du projet LUXTRAM « en souterrain » ;
en vert, la zone d'étude

Le projet correspond au tracé suivant :

- Depuis la Place de l'Étoile où elle rejoindra la ligne « A » existante, la nouvelle ligne va suivre la Route d'Arlon jusqu'au CHL : cette zone comprend des habitations, quelques commerces et des bureaux. Suivant le PAG (voir Figure 2), le projet est situé en *zone mixte urbaine centrale*, en zone *mixte urbaine*, en zone de *bâtiments et d'équipements publics*, et en zone d'habitation 2. Une partie de la ligne sera construite en souterrain : la ligne plonge en tunnel à partir du stade et revient en surface au niveau du CHL.
- Au niveau du CHL, la ligne suivra la Rue Pierre Federspiel et fera une boucle autour des habitations de la Rue Fernand Mertens jusqu'à la Route d'Arlon où le projet étudié se termine. Sur cette partie, les habitations se trouvent en *zone d'habitation 2* et en *zone mixte urbaine*, le CHL se trouve quant à lui en *zone de bâtiments et d'équipement publics*, tout en n'oubliant pas que cela reste un hôpital.

1.4 Méthodologie retenue

La méthodologie utilisée pour la présente étude a été soumise à l'approbation préalable des membres du Comité d'Accompagnement du projet.

Les prescriptions des documents suivants ont été suivies :

- Guide pour une approche systématique de la réalisation des études acoustiques sur l'environnement humain – Décembre 2018, publié par l'Administration de l'environnement ;
- Guide pour la réalisation d'études d'impact sonore environnemental pour les établissements et chantiers – octobre 2018, publié par l'Administration de l'environnement.

La réglementation suivante est d'application :

- La loi du 21 juin 1976 relative à la lutte contre le bruit (Texte coordonné - Mémorial A-N° 282 du 31 décembre 2012).
- Le règlement grand-ducal du 7 novembre 2007 modifiant le règlement grand-ducal du 13 février 1979 concernant le niveau de bruit dans les alentours immédiats des établissements et des chantiers (Mémorial A-N°204 du 23 novembre 2007).
- 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) ;

La méthodologie appliquée correspond aux étapes suivantes :

- L'étude sur base de la modélisation 3D informatique de la propagation sonore des différentes phases de chantier.
- L'étude des risques vibratoires pour la réalisation du chantier.

2. ETUDES DES INCIDENCES ACOUSTIQUES DU CHANTIER

2.1 Méthodologie générale

La méthodologie retenue est l'étude quantitative des incidences acoustiques, phase par phase, sur la totalité du projet, grâce à l'utilisation de la maquette 3D déjà établie lors de l'étude des incidences acoustiques de la phase exploitation du projet.

Nous allons ci-après décrire les données et hypothèses qui ont été retenues.

2.2 Données

Lors de l'étude des incidences acoustiques de l'exploitation du futur tramway, une maquette 3D a été établie : c'est sur base de cette maquette que l'impact des différentes phases du chantier est étudié.

Le déroulement des travaux a été communiqué par Schroeder & Associés : il est présenté en annexe 4.3 et le planning en annexe 4.4 et 4.5.

En grandes lignes, les travaux pour la **partie en souterrain** vont se dérouler en 7 phases potentiellement bruyantes :

- Terrassement et déviation des réseaux au niveau des parois berlinoises ;
- Réalisation des pieux forés ;
- Réalisation de parois berlinoises;
- Terrassement pour la dalle;
- Réalisation de la dalle supérieure;
- Remblais de la voirie ;
- Terrassement en taupe, dalle inférieure et infrastructure.

Les chantiers **en surface** se déroulent quant à eux en 3 phases :

1. Décapage de l'asphalte ;
2. Terrassement avec la déviation de l'ensemble des réseaux présents ;
3. Travaux d'infrastructures (réseaux, pose de voies).

Le Tableau 1 précise les types de travaux, les types d'engins utilisés à cet effet et leur pourcentage d'utilisation journalier (%), ainsi que les types de puissance acoustique considérés dans l'étude.

Tableau 1 : détail des types de travaux par phase

2.1	Planning des travaux pour la tranchée couverte : tronçon entier de 800m	Engin utilisé et % d'utilisation journalier	PWL
2.1.1	Phase 1 : Terrassement et déviation des réseaux au niveau des parois berlinoises	4 mini-pelles Yanmar vio 26-6 (100%)	1
		Camions : 1 camion/jour (100%)	-

2.2	Planning des travaux pour la tranchée couverte : tronçons de 100 m (150 m au niveau des trémies)	Engin utilisé et % d'utilisation journalier	PWL
2.2.1	Phase 1 : Réalisation des pieux forés	2 foreuses type Bauer BG-20 (100%)	6
		Chargeuse sur pneu type Liebherr L 514 (100%)	2
2.2.2	Phase 2 : Réalisation des parois berlinoises	1 foreuse type Bauer BG-20 (100%)	6
		Chargeuse sur pneu type Liebherr L 514 (100%)	2
2.2.3	Phase 3 : Terrassement pour la dalle	2 pelles hydrauliques de type Liebherr 934 C (100%)	3
		Camions : 10 camions/jour (100%)	-
2.2.4	Phase 4 : Réalisation de la dalle supérieure (armatures, bétonnage, complexe étanchéité)	158 Camions toupies (237 tronçon de 150m)(100%)	7
		Pompe à béton (100%)	5
2.2.5	Phase 5 : Remblais de la voirie	2 pelles hydrauliques de type Liebherr 934 C (100%)	3
		Camions : 10 camions/jour (100%)	-
2.2.6.1	Phase 6.1 : Terrassement en taupe	2 pelles hydrauliques de type Liebherr 934 C (100%)	3
2.2.6.2	Phase 6.2 : Dalle inférieure et infrastructure	170 Camions toupies (240 tronçon de 150m)(100%)	7
		Pompe à béton (100%)	5

2.3	Planning des travaux pour l'insertion du tramway en surface : Section 1 Raccordement à la ligne existante	Engin utilisé et % d'utilisation journalier	PWL
2.3.1	Phase : Décapage de l'asphalte et terrassement avec la déviation de l'ensemble des réseaux présents	2 pelles hydrauliques de type Liebherr 934 C (100%)	3
		Camions : 25 camions/jour (100%)	-
2.3.2	Phase : Travaux d'infrastructures (réseaux, pose de voies), remblai	2 pelles hydrauliques de type Liebherr 934 C (100%)	3
		Camions : 25 camions/jour (100%)	-
		Rouleau compacteur (100%)	4

2.4	Planning des travaux pour l'insertion du tramway en surface : Section 2 Place de l'Etoile	Engin utilisé et % d'utilisation journalier	PWL
2.4	Phase : Travaux d'infrastructures (multis, plateforme, pose de voies)	1 pelle hydraulique de type Liebherr 934 C (100%)	3
		Camions : 2 camions/jour (100%)	-

2.5	Planning des travaux pour l'insertion du tramway en surface : Section 3	Engin utilisé et % d'utilisation journalier	PWL
2.5.1	Phase : Décapage de l'asphalte et terrassement avec la déviation de l'ensemble des réseaux présents	2 pelles hydrauliques de type Liebherr 934 C (100%)	3
		Camions : 25 camions/jour (100%)	-
2.5.2	Phase : Travaux d'infrastructures (réseaux, pose de voies), remblai	2 pelles hydrauliques de type Liebherr 934 C (100%)	3
		Camions : 25 camions/jour (100%)	-
		Rouleau compacteur (100%)	4

2.6	Planning des travaux pour l'insertion du tramway en surface : Section 4	Engin utilisé et % d'utilisation journalier	PWL
2.6.1	Phase : Décapage de l'asphalte et terrassement avec la déviation de l'ensemble des réseaux présents	2 pelles hydrauliques de type Liebherr 934 C (100%)	3
		Camions : 25 camions/jour (100%)	-
2.6.2	Phase : Travaux d'infrastructures (réseaux, pose de voies), remblai	2 pelles hydrauliques de type Liebherr 934 C (100%)	3
		Camions : 25 camions/jour (100%)	-
		Rouleau compacteur (100%)	4

2.7	Planning des travaux pour l'insertion du tramway en surface : Section 5	Engin utilisé et % d'utilisation journalier	PWL
2.7.1	Phase 1 : Nouvelle rue d'Ostende Décapage de l'asphalte et terrassement avec la déviation de l'ensemble des réseaux présents	2 pelles hydrauliques de type Liebherr 934 C (100%)	3
		Camions : 30 camions/jour (100%)	-
2.7.2	Phase 1 : Nouvelle rue d'Ostende Travaux d'infrastructures (réseaux, pose de voies), remblai	2 pelles hydrauliques de type Liebherr 934 C (100%)	3
		Camions : 30 camions/jour (100%)	-
		Rouleau compacteur (100%)	4
2.7.3	Phase 2 : Ancienne rue d'Ostende Décapage de l'asphalte et terrassement avec la déviation de l'ensemble des réseaux présents	2 pelles hydrauliques de type Liebherr 934 C (100%)	3
		Camions : 30 camions/jour (100%)	-
2.7.4	Phase 2 : Ancienne rue d'Ostende Travaux d'infrastructures (réseaux, pose de voies), remblai	2 pelles hydrauliques de type Liebherr 934 C (100%)	3
		Camions : 30 camions/jour (100%)	-
		Rouleau compacteur (100%)	4

2.8	Planning des travaux pour l'insertion du tramway en surface : Sections 13 et 14	Engin utilisé et % d'utilisation journalier	PWL
2.8.1	Phase : Décapage de l'asphalte et terrassement avec la déviation de l'ensemble des réseaux présents	2 pelles hydrauliques de type Liebherr 934 C (100%)	3
		Camions : 30 camions/jour (100%)	-
2.8.2	Phase : Travaux d'infrastructures (réseaux, pose de voies), remblai	2 pelles hydrauliques de type Liebherr 934 C (100%)	3
		Camions : 30 camions/jour (100%)	-
		Rouleau compacteur (100%)	4

2.9	Planning des travaux pour l'insertion du tramway en surface : Section 15	Engin utilisé et % d'utilisation journalier	PWL
2.9	Phase : Travaux d'infrastructures (multis, plateforme, pose de voies)	1 pelle hydraulique de type Liebherr 934 C (100%)	3
		Camions : 2 camions/jour (100%)	-

Le Tableau 2 précise les puissances acoustiques considérées pour chaque type d'engin prévu.

Tableau 2 : puissances acoustiques considérées par type d'engin

		LW Spectra 1/3 - 1/1 octave [dB(Lin)]										Global
		31.5	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	16k	dB(A)
1	Mini-pelle de type Yanmar vio 26-6	98.9	103.9	100	88.1	89.7	90.8	89.1	83.5	80.6	74.3	95.4
2	Chargeuse sur pneu type Liebherr L 514	116.4	104.1	103.4	101.6	101.8	104.5	103.8	98.7	91.5	81.1	109.0
3	Pelle hydraulique de type Liebherr 934 C	112.1	104	105.1	99.3	100	101.9	100.6	93.3	87.7	79	106.1
4	Rouleau compacteur	121.4	114.6	110.1	101.2	99.1	101.3	99.4	94.2	88.9	80.7	105.8
5	Truck mounted concrete pump+boom arm 17T		99	104	99	104	104	100	94	90		107.5
6	Foreuse type Bauer BG-20	100.2	96.5 99.7 107.4	95.1 96.6 97.0	95.8 95.9 98.8	97.8 97.5 98.1	98.8 98.4 99.5	100.0 100.1 98.7	100.3 99.3 99.1	99.7 99.0 98.5		111.0
7	Camion livraison ciment (compresseur)	100.0 98.0 114.0	110.0 105.0 108.0	103.0 102.0 94.0	92.0 92.0 93.0	95.4 94.0 96.0	93.0 101.0 94.0	95.0 95.0 93.0	93.0 86.0 89.0	88.0 82.0 75.0		106.0

Enfin, le « Planning provisoire des travaux » ainsi que le « Planning chemin de fer » sont présentés en Figure 4 ci-après (voir aussi en annexe).

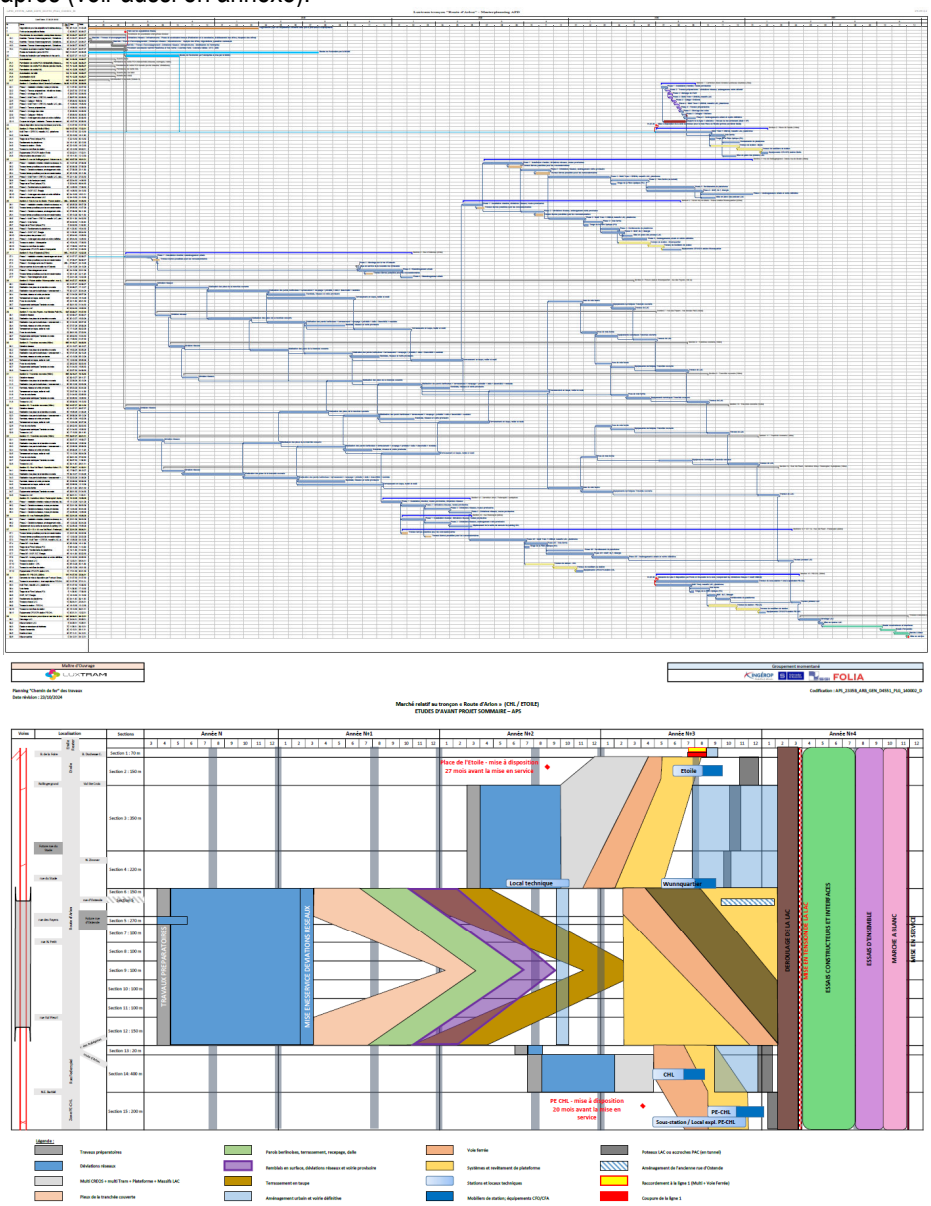


Figure 4 : Planning provisoire des travaux et Planning chemin de fer

2.3 Méthodes de calcul utilisées

Les calculs sont effectués avec le logiciel IMMI Premium-2024 : les méthodes de calcul ISO 9613-2[2] (sources fixes) et RLS-90[3] (sources mobiles).

Ces méthodes de calcul prennent en compte tous les paramètres de propagation tels que la distance sources-points de réception / immission, l'absorption du son dans l'air, les phénomènes atmosphériques, le type de directivité des sources, les parois des bâtiments sur lesquels une réflexion acoustique est possible, les écrans, ...

La maquette numérique 3D détaillée modélise toute la zone concernée par le chantier et son environnement, ainsi que l'ensemble du bâti et la topographie.

- Le tracé s'étend sur environ 3.150 mètres, la maquette s'étend sur une zone de 4.200 mètres (Est-Ouest) par 1.700 mètres (Nord-Sud) : elle a été établie sur base de données BD-Topo 2013 ;
- Toutes les hypothèses de conditions de chantier ont été communiquées par Schroeder & Associés ;
- Les calculs sont effectués :
  - De façon détaillée à chaque façade et chaque étage de tous les bâtiments du premier front bâti, soit un échantillon de pas moins de 52 bâtiments : ces bâtiments sont répertoriés respectivement aux plans 1 et 2 présentés en annexe 4.1;
  - Pour les conditions météo correspondant à une température de 15°C et à un taux d'humidité de 70%, en supposant une propagation de type « downwind »,
  - Avec prise en compte de l'ordre de réflexion : N=3 ;
  - Et avec prise en compte du sol, tant comme obstacle potentiel à la propagation du bruit (déblai, remblai, butte, pont…), que comme élément « dissipant » (les valeurs suivantes du facteur ont été considérées : G = 0.3 pour les zones urbaines denses et les grands plans réflecteurs, et G = 1 pour les zones « vertes » ;
  - Le chantier est divisé en 15 sections et avance progressivement le long de son axe (voir localisation en annexe 4.2) : pour chacune de ces sections, le chantier a été simulé pour le cas le plus défavorable, soit en face des habitations les plus proches des engins bruyants.

[2] ISO 9613-2 : Acoustique -- Atténuation du son lors de sa propagation à l'air libre -- Partie 2: Méthode générale de calcul
[3] RLS-90 : Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen

2.4 Détermination des incidences

Pour la phase de chantier, c'est le Règlement Grand-Ducal concernant le niveau de bruit dans les alentours immédiats des établissements et des chantiers qui est d'application.

Ce règlement, dans son article 3, recommande de ne pas dépasser dans les alentours immédiats les niveaux de bruit indiqués au Tableau 3 ci-après, suivant les distinctions établies en fonction de la nature du milieu d'habitat. Pour les points d'immission considérés dans cette étude, les zones correspondantes ont été déduites de l'analyse sur le terrain, et notamment la prise en compte des niveaux de bruit ambiants actuels (relevés dans l'étude de la phase exploitation) et de l'importance des circulations actuelles : ces zones ont déjà été présentées au Tableau 3, qui est utilement repris au Tableau 4 du point 2.4.1 Affectation des bâtiments.

Le Tableau 3 résume les seuils à appliquer aux indicateurs L_{jour} (07-22H) et L_{nuit} (22-07H)[4], et qui correspondent finalement aux recommandations suivantes :

Tableau 3 : recommandations du Règlement concernant les bruits des établissements et des chantiers

Zone	Niveau de bruit (dB(A))		Nature du milieu d'habitat
	jour	nuit	
I	45	35	hôpitaux, quartier de récréation
II	50	35	milieu rural, habitat calme, circulation faible
III	55	40	quartier urbain, majorité d'habitat, circulation faible
IV	60	45	quartier urbain avec quelques usines ou entreprises, circulation moyenne
V	65	50	centre ville (entreprises, commerces, bureaux, divertissements), circulation dense
VI	70	60	prédominance industrie lourde

L'article 5. autorise des dépassements de 20 dB(A) si les travaux durent moins de 1 mois, de 15 dB(A) si les travaux durent entre 1 mois et 6 mois, et de 10 dB(A) si les travaux durent entre 6 mois et 1 an. En fait, si l'ensemble des travaux va effectivement dépasser 1 an, les différentes phases de chantier seront nettement plus courtes, entrecoupées de périodes de latence entre elles, et réalisées à différents endroits tout au long du projet.

- **Remarque :** les durées présentées dans le Règlement, sont des durées « calendrier ».

L'article 6. du règlement indique que les travaux sont interdits la nuit, mais la modification du 7-11-2007 les permet dans des circonstances spéciales et sur demande : cette remarque importante sera à considérer pour les travaux de nuit. Ces travaux seront limités aux aménagements de carrefours, qui nécessiteront des demandes de permis spécifiques.

Enfin, par rapport aux *niveaux recommandés*, **l'article 8.** du règlement interdit de dépasser « de façon permanente ou à intervalles réguliers » les niveaux recommandés de plus de 10 dB(A).

[4] Remarquons que les périodes des indicateurs de ce règlement [L_{jour} (07-22H) et L_{nuit} (22-07H)] diffèrent de celles de la norme allemande 16. BIm Sch V [L_{Tag} ou L_{Aeq} (06-22H), L_{Nacht} ou L_{Aeq} (22-06H)], norme d'application pour la phase d'exploitation du projet.
Les travaux de construction sont prévus pour une période totale de 9 heures à choisir sur la période de 15 heures entre 07 et 22H.

Finalement, nous avons donc considéré pour la présente étude :

- **En période de jour :**
  - Les *valeurs limites recommandées* suivant les zones définies au Tableau 4,
  - L'application des *dépassements autorisés en fonction de la durée effective* de chaque phase de chantier suivant l'article 5, soit une correction de + 20, + 15 ou + 10 dB(A) en fonction de la durée totale ;
  - Les *valeurs maximales* correspondant aux *valeurs limites recommandées + 10 dB(A)*, cette valeur de 10 dB(A) constituant la limite ultime à ne pas dépasser, suivant l'article 8.
- **En période de nuit :**
  - Suivant l'article 6, les travaux de nuit devront faire l'objet de demandes d'autorisation spécifiques. Actuellement il n'y a pas des travaux prévus en période de nuit.

2.4.1 Affectation des bâtiments

L'étude des niveaux sonores dans l'environnement a été réalisée à chaque étage des façades les plus exposées des 52 bâtiments échantillonnés le long du chantier.

Selon le PAG de la Ville de Luxembourg, les affectations sont reprises au Tableau 4. En dernière colonne de ce tableau, on retrouve le type de zone correspondant à leur exposition / affectation / localisation, selon Règlement Grand-Ducal concernant le niveau de bruit dans les alentours immédiats des établissements et des chantiers.

Remarque :
L'affectation des bâtiments à une zone particulière d'habitat (suivant le Tableau 4), doit être faite en fonction d'une évaluation combinant les PAG et de 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 suivant leur exposition actuelle effective.

Tableau 4 : description des points d'immission : affectations, types, exposition et zones considérées
NB : pour information, l'avant-dernière colonne reprend les affectations considérées dans l'étude de l'exploitation, la dernière correspond à l'étude du chantier

Bâtiment	Zone	Affectation PAG	Description	(Zone) (16.BImSchV)	Zone Règlement GD 13-02-1979
1	Route d'Arlon	Zone spéciale "Administration"	Centre urbain	(3)	V
2 à 6	Route d'Arlon	Zone d'habitation 2	Centre urbain	(3)	V
7 et 8	Route d'Arlon	Zone mixte urbaine	Centre urbain	(3)	V
9 à 12	Route d'Arlon	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
16 à 27	Route d'Arlon	Zone mixte urbaine	Centre urbain	(3)	V
28	Route d'Arlon	Zone d'habitation 2	Centre urbain	(3)	V
29	Route d'Arlon	Zone d'habitation 1	Centre urbain	(3)	V
30 et 31	Route d'Arlon	Zone mixte urbaine	Centre urbain	(3)	V
32	Route d'Arlon	Zone de bâtiments et équipements publics	Centre urbain	(3)	V
33 à 40	Route d'Arlon	Zone mixte urbaine	Centre urbain	(3)	V
41 à 47	Route d'Arlon	Zone d'habitation 2	Centre urbain	(3)	V
48 et 49	Route d'Arlon	Zone d'habitation 1	Centre urbain	(3)	V
50 à 52	Av. Emile Reuter	Zone mixte urbaine	Centre urbain très fréquenté	(3)	V

2.5 Présentation des résultats

Comme indiqué en 2.3, l'étude a été réalisée sur les 15 sections du chantier tout au long de tracé.

Les Tableau 5 à Tableau 20 présentent les résultats synthétisés sous forme tabulaire par localisation de zone de travaux reprenant :

- Le numéro du point d'immission concerné ;
- La durée par phase et la durée totale de l'ensemble des phases ;
- Les corrections suivant l'article 5 et 8 si d'application ;
- Le nom de la phase ;
- Le critère adapté ;
- Le $L_{Aeq(07\text{-}22H)}$ maximum et le nombre de jours où le critère est dépassé[5] ;
- Le dépassement.

Grâce à ces tableaux, malgré la complexité des résultats, il sera possible d'aller à l'essentiel et de comprendre quelles phases vont directement respecter les critères ou non.

Remarque :
Les durées des différentes phases de chantier sont exprimées en **jours ouvrables**, donc : une semaine calendrier correspond à 5 jours ouvrables, un mois calendrier à 20 jours ouvrables et une année calendrier à 240 jours ouvrables.

2.6 Analyse des résultats

Il est à noter qu'en l'absence d'un planning journalier détaillé quant aux pourcentages d'utilisation des engins de chantier (Tableau 1), les calculs ont été réalisés en considérant une utilisation de tous les engins concernés par phase pendant 100% du temps, lorsque les machines se retrouvent en face des points de calculs : les niveaux calculés ici peuvent donc être considérés comme « maxima maximorum », avec une erreur par excès garantissant de ne pas sous-estimer les incidences.

Une utilisation plus rationnelle / circonstanciée des engins conduira bien sûr à des niveaux inférieurs, tout en gardant à l'esprit que les réductions de bruit suivront la logique « logarithmique » :

$$L_P = L_{100\%} + 10\log_{10}[P] \quad (dB)$$

Où P est le pourcentage effectif de l'engin concerné (P ≤ 1) ; pour éviter autant que faire se peut la complexité de cette formule, retenons en grandes lignes que :

- Réduire à 80 % l'utilisation d'un engin ne correspond qu'à une réduction de 1 dB
- Réduire à 50 % l'utilisation d'un engin ne correspond qu'à une réduction de 3 dB
- Réduire à 10 % l'utilisation d'un engin correspond à une réduction de 10 dB, mais alors l'engin est nettement moins utilisé…

L'analyse des résultats est faite section par section (voir localisation en annexe 4.2) ci-après.

[5] Dans ce cas précis, la vitesse d'avancement des engins par rapport au point de calcul (fixe) va faire que le bruit va progressivement diminuer lorsque les engins vont s'écarter du
point, ou augmenter si les engins s'en rapprochent : le nombre de jours pour lesquels le critère va être dépassé est ainsi calculé.

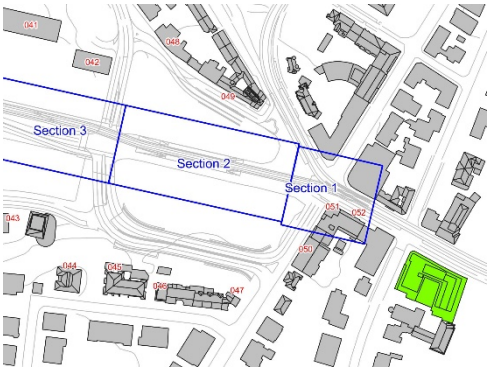
2.6.1 Section 1 – Tramway en surface

Tableau 5 : Résultats pour la Section 1

Section 1				Pt de calcul		
				50	51	52
Durée [jour]	CF Art 5 [dB]	CF Art 8 [dB]	Phase	Critère adapté $L_{Aeq(07-22H)}$		
20	15	10	2.3.1	90	90	90
20	15	10	2.3.2	90	90	90
40						

Phase	Maximum $L_{Aeq(07-22H)}$		
2.3.1	65.8	78.5	80.1
2.3.2	67.8	79.8	81.6

Phase	Dépassement $L_{Aeq(07-22H)}$		
2.3.1			
2.3.2			



Ce chantier spécifique respectera les recommandations fixées par le Règlement Grand-Ducal.

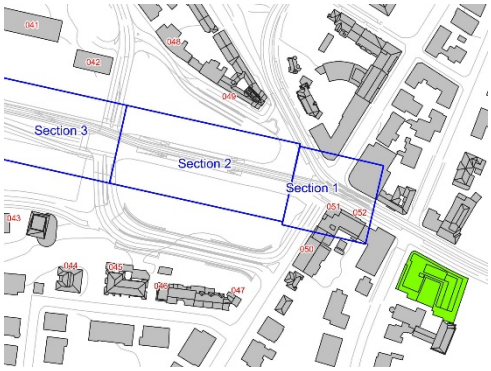
2.6.2 Section 2 – Tramway en surface

Tableau 6 : Résultats pour la Section 2

Section 2				Pt de calcul				
				45	46	47	48	49
Durée [jour]	CF Art 5 [dB]	CF Art 8 [dB]	Phase	Critère adapté $L_{Aeq(07-22H)}$				
60	15	10	2.4	90	90	90	90	90
60								

Phase	Maximum $L_{Aeq(07-22H)}$				
2.4	57.7	58.0	59.0	60.4	62.4

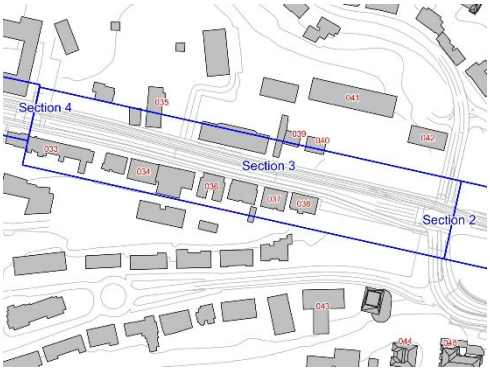
Phase	Dépassement $L_{Aeq(07-22H)}$				
2.4					



Ce chantier spécifique respectera les recommandations fixées par le Règlement Grand-Ducal.

2.6.3 Section 3 – Tramway en surface

Tableau 7 : Résultats pour la Section 3



Section 3				Pt de calcul											
				33	**34**	**35**	**36**	**37**	**38**	**39**	**40**	**41**	**42**	**43**	**44**
Durée [jour]	CF Art 5 [dB]	CF Art 8 [dB]	Phase	Critère adapté $L_{Aeq(07\text{-}22H)}$											
80	10	10	2.5.1	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85
80	10	10	2.5.2	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85
160															

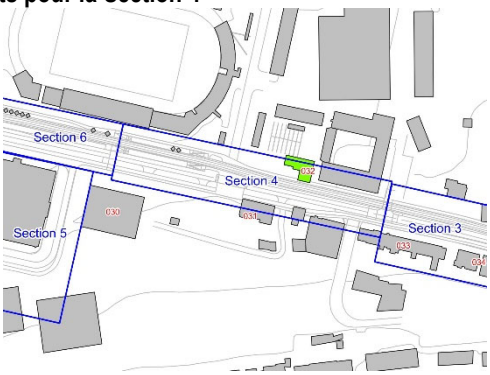
Phase	Maximum $L_{Aeq(07\text{-}22H)}$											
2.5.1	76.8	77.2	82.0	79.5	78.2	78.7	76.7	75.8	67.2	68.8	61.2	61.1
2.5.2	78.3	78.8	84.3	80.9	79.6	80.1	78.8	77.6	68.9	70.6	63.0	62.7

Phase	Dépassement $L_{Aeq(07\text{-}22H)}$											
2.5.1												
2.5.2												

Ce chantier spécifique respectera les recommandations fixées par le Règlement Grand-Ducal.

2.6.4 Section 4 – Tramway en surface

Tableau 8 : Résultats pour la Section 4



Section 4

Durée [jour]	CF Art 5 [dB]	CF Art 8 [dB]	Phase	Pt de calcul 30	Pt de calcul 31	Pt de calcul 32
				Critère adapté $L_{Aeq(07-22H)}$		
60	10	10	2.6.1	85	85	65
60	10	10	2.6.2	85	85	65
120						

Phase	Maximum $L_{Aeq(07-22H)}$		
2.6.1	70.7	76.9	89.2
2.6.2	72.3	78.4	93.2

Phase	Dépassement $L_{Aeq(07-22H)}$		
2.6.1			24.2
2.6.2			28.2

Pt de calcul 30	Pt de calcul 31	Pt de calcul 32	
		25	jours effectifs > 65 dB(A)
		25	jours effectifs > 65 dB(A)
Tot.		50	jours effectifs > 65 dB(A)

Le point de calcul le plus concerné est le point 32.

La durée totale du chantier est de 120 jours ouvrables ce qui pourrait bien dépasser 6 mois calendrier : une correction de durée limitée à 10 dB est applicable.

Au point 32, on constate que les phases 2.6.1 (décapage et terrassement) et 2.6.2 (travaux d'infrastructures) pourraient dépasser les critères : ces critères seraient dépassés pendant 25 jours en phase 2.6.1, et 25 jours en phase 2.6.2, l'exposition est très importante avec des dépassements jusqu'à 28 dB(A).

Ainsi, dès à présent, il est conseillé :

- D'utiliser des pelles hydrauliques encore moins bruyantes que celles ici considérées ;
- D'entourer les engins par des écrans de chantier amovibles acoustiquement isolants [DL_{SI}>30 dB(A)[6]] et absorbants [$DL_{RI,NRD}$> 0.7[7]] placés autour de la zone de chantier sur une hauteur de 4 m de haut pendant toute la durée des travaux;
- D'adapter les horaires d'utilisation des engins de façon adéquate.

Suivant ces adaptations, il est raisonnable de penser que le chantier puisse respecter les recommandations d'application.

[6] Selon la norme ILNAS EN 1793-6
[7] Selon la norme ILNAS EN 1793-5

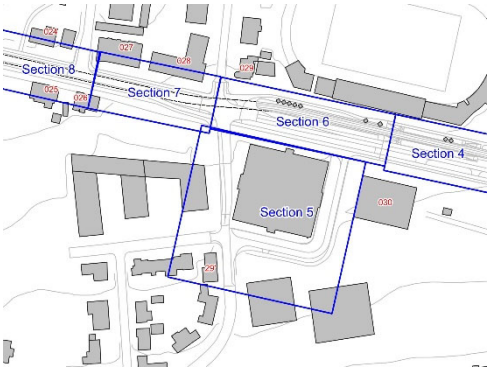
2.6.5 Section 5 – Nouvelle rue d'Ostende – Tramway en surface

Tableau 9 : Résultats pour la Section 5 – Nouvelle rue d'Ostende

Section 5 New				Pt de calcul		
				29	29'	30
Durée [jour]	CF Art 5 [dB]	CF Art 8 [dB]	Phase	Critère adapté $L_{Aeq(07-22H)}$		
15	15	10	2.7.1	90	90	90
15	15	10	2.7.2	90	90	90
30						

Phase	Maximum $L_{Aeq(07-22H)}$		
2.7.1	58.4	42.1	70.7
2.7.2	60.6	43.7	72.3

Phase	Dépassement $L_{Aeq(07-22H)}$		
2.7.1			
2.7.2			



Ce chantier spécifique respectera les recommandations fixées par le Règlement Grand-Ducal.

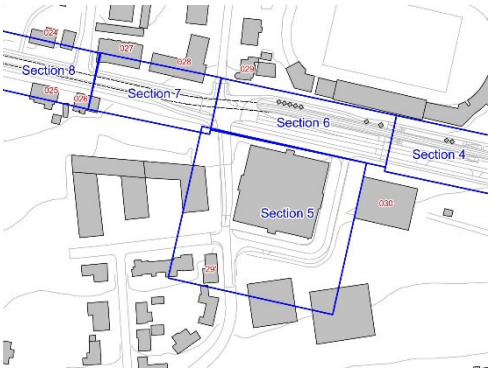
2.6.6 Section 5 – Ancienne rue d'Ostende – Tramway en surface

Tableau 10 : Résultats pour la Section 5 – Ancienne rue d'Ostende

Section 5 Old				Pt de calcul		
				29	29'	30
Durée [jour]	CF Art 5 [dB]	CF Art 8 [dB]	Phase	Critère adapté $L_{Aeq(07-22H)}$		
20	15	10	2.7.3	90	90	90
20	15	10	2.7.4	90	90	90
40						

Phase	Maximum $L_{Aeq(07-22H)}$		
2.7.3	58.4	42.1	70.7
2.7.4	60.6	43.7	72.3

Phase	Dépassement $L_{Aeq(07-22H)}$		
2.7.3			
2.7.4			



Ce chantier spécifique respectera les recommandations fixées par le Règlement Grand-Ducal.

2.6.7 Trémie tranché couverte

Les travaux de la tranchée couverte correspondent aux sections 6 à 12 : l'analyse des résultats de toutes ces sections est regroupée en fin du chapitre 2.6.7.7 .

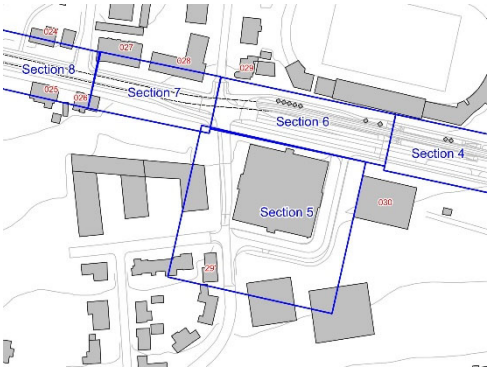
2.6.7.1 Section 6

Tableau 11 : Résultats pour la Section 6

Section 6

Durée [jour]	CF Art 5 [dB]	CF Art 8 [dB]	Phase	Pt de calcul 29 Critère adapté $L_{Aeq(07-22H)}$
31.4	0	10	2.1	75
75	0	10	2.2.1	75
34	0	10	2.2.2	75
20	0	10	2.2.3	75
75	0	10	2.2.4	75
60	0	10	2.2.5	75
23	0	10	2.2.6.1	75
20	0	10	2.2.6.2	75
338.4				

Pt de calcul
29



Phase	Maximum $L_{Aeq(07-22H)}$
2.1	61.7
2.2.1	81.3
2.2.2	79.3
2.2.3	75.4
2.2.4	77.6
2.2.5	75.4
2.2.6.1	75.4
2.2.6.2	77.6

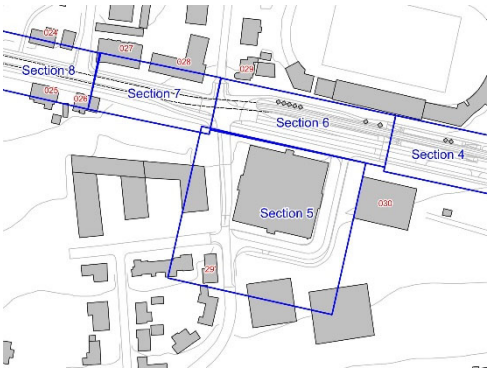
Phase	Dépassement $L_{Aeq(07-22H)}$	Pt de calcul 29	
2.1			
2.2.1	6.3	15	jours effectifs > 75 dB(A)
2.2.2	4.3	6	jours effectifs > 75 dB(A)
2.2.3	0.4	1	jours effectifs > 75 dB(A)
2.2.4	2.6	9	jours effectifs > 75 dB(A)
2.2.5	0.4	2	jours effectifs > 75 dB(A)
2.2.6.1	0.4	1	jours effectifs > 75 dB(A)
2.2.6.2	2.6	2	jours effectifs > 75 dB(A)
	Tot.	36	jours effectifs > 75 dB(A)

2.6.7.2 Section 7

Tableau 12 : Résultats pour la Section 7

Section 7				Pt de calcul		
				26	27	28
Durée [jour]	CF Art 5 [dB]	CF Art 8 [dB]	Phase	Critère adapté $L_{Aeq(07-22H)}$		
31.4	0	10	2.1	75	75	75
50	0	10	2.2.1	75	75	75
22	0	10	2.2.2	75	75	75
15	0	10	2.2.3	75	75	75
50	0	10	2.2.4	75	75	75
50	0	10	2.2.5	75	75	75
15	0	10	2.2.6.1	75	75	75
15	0	10	2.2.6.2	75	75	75
248.4						

Pt de calcul		
26	27	28



Phase	Maximum $L_{Aeq(07-22H)}$		
2.1	65.5	63.8	63.3
2.2.1	85.4	83.3	83.0
2.2.2	83.2	81.3	81.0
2.2.3	79.5	77.5	77.1
2.2.4	81.7	79.7	79.3
2.2.5	79.5	77.5	77.1
2.2.6.1	79.5	77.5	77.1
2.2.6.2	81.7	79.7	79.3

Phase	Dépassement $L_{Aeq(07-22H)}$			Pt de calcul 26	27	28	
2.1							
2.2.1	10.4	8.3	8.0	23	19	18	jours effectifs > 75 dB(A)
2.2.2	8.2	6.3	6.0	8	6	6	jours effectifs > 75 dB(A)
2.2.3	4.5	2.5	2.1	4	3	2	jours effectifs > 75 dB(A)
2.2.4	6.7	4.7	4.3	16	13	12	jours effectifs > 75 dB(A)
2.2.5	4.5	2.5	2.1	13	9	8	jours effectifs > 75 dB(A)
2.2.6.1	4.5	2.5	2.1	4	3	2	jours effectifs > 75 dB(A)
2.2.6.2	6.7	4.7	4.3	5	4	4	jours effectifs > 75 dB(A)
			Tot.	73	57	52	jours effectifs > 75 dB(A)

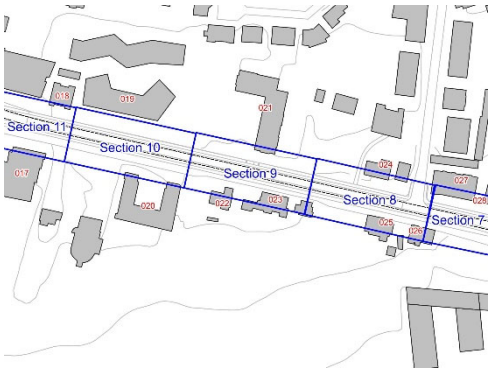
2.6.7.3 Section 8

Tableau 13 : Résultats pour la Section 8

Section 8

Durée [jour]	CF Art 5 [dB]	CF Art 8 [dB]	Phase	Pt de calcul 24	Pt de calcul 25
				Critère adapté $L_{Aeq(07-22H)}$	
31.4	0	10	2.1	75	75
50	0	10	2.2.1	75	75
22	0	10	2.2.2	75	75
15	0	10	2.2.3	75	75
50	0	10	2.2.4	75	75
50	0	10	2.2.5	75	75
15	0	10	2.2.6.1	75	75
15	0	10	2.2.6.2	75	75
248.4					

Pt de calcul 24	Pt de calcul 25



Phase	Maximum $L_{Aeq(07-22H)}$	
2.1	62.9	65.4
2.2.1	82.9	85.1
2.2.2	80.7	83.0
2.2.3	76.7	79.2
2.2.4	79.0	81.5
2.2.5	76.7	79.2
2.2.6.1	76.7	79.2
2.2.6.2	79.0	81.5

Phase	Dépassement $L_{Aeq(07-22H)}$		Pt de calcul 24	Pt de calcul 25	
2.1					
2.2.1	7.9	10.1	18	22	jours effectifs > 75 dB(A)
2.2.2	5.7	8.0	6	8	jours effectifs > 75 dB(A)
2.2.3	1.7	4.2	2	4	jours effectifs > 75 dB(A)
2.2.4	4.0	6.5	12	16	jours effectifs > 75 dB(A)
2.2.5	1.7	4.2	7	12	jours effectifs > 75 dB(A)
2.2.6.1	1.7	4.2	2	4	jours effectifs > 75 dB(A)
2.2.6.2	4.0	6.5	3	4	jours effectifs > 75 dB(A)
		Tot.	50	70	jours effectifs > 75 dB(A)

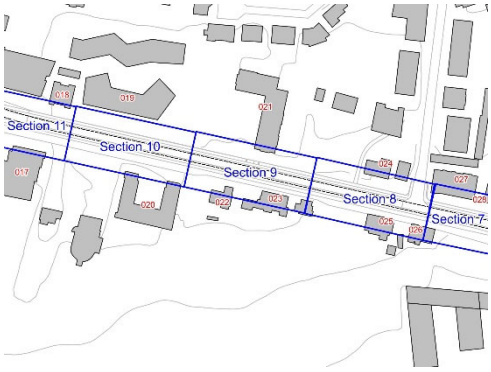
2.6.7.4 Section 9

Tableau 14 : Résultats pour la Section 9

Section 9

Durée [jour]	CF Art 5 [dB]	CF Art 8 [dB]	Phase	Pt de calcul 21	Pt de calcul 22	Pt de calcul 23
				Critère adapté $L_{Aeq(07-22H)}$		
31.4	0	10	2.1	75	75	75
50	0	10	2.2.1	75	75	75
22	0	10	2.2.2	75	75	75
15	0	10	2.2.3	75	75	75
50	0	10	2.2.4	75	75	75
50	0	10	2.2.5	75	75	75
15	0	10	2.2.6.1	75	75	75
15	0	10	2.2.6.2	75	75	75
248.4						

Pt de calcul 21	Pt de calcul 22	Pt de calcul 23



Phase	Maximum $L_{Aeq(07-22H)}$		
2.1	63.4	63.1	64.9
2.2.1	83.1	82.9	84.5
2.2.2	81.1	80.8	82.4
2.2.3	77.1	77.0	78.7
2.2.4	79.3	79.2	80.9
2.2.5	77.1	77.0	78.7
2.2.6.1	77.1	77.0	78.7
2.2.6.2	79.3	79.2	80.9

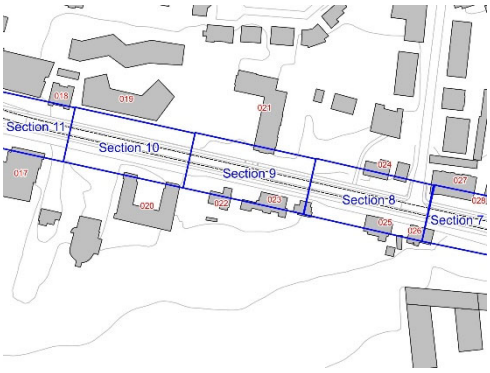
Phase	Dépassement $L_{Aeq(07-22H)}$			Pt de calcul 21	Pt de calcul 22	Pt de calcul 23	
2.1							
2.2.1	8.1	7.9	9.5	18	18	21	jours effectifs > 75 dB(A)
2.2.2	6.1	5.8	7.4	6	6	7	jours effectifs > 75 dB(A)
2.2.3	2.1	2.0	3.7	2	2	3	jours effectifs > 75 dB(A)
2.2.4	4.3	4.2	5.9	12	12	15	jours effectifs > 75 dB(A)
2.2.5	2.1	2.0	3.7	8	8	12	jours effectifs > 75 dB(A)
2.2.6.1	2.1	2.0	3.7	2	2	3	jours effectifs > 75 dB(A)
2.2.6.2	4.3	4.2	5.9	4	4	4	jours effectifs > 75 dB(A)
			Tot.	52	52	65	jours effectifs > 75 dB(A)

2.6.7.5 Section 10

Tableau 15 : Résultats pour la Section 10

Section 10				Pt de calcul	
				19	20
Durée [jour]	CF Art 5 [dB]	CF Art 8 [dB]	Phase	Critère adapté $L_{Aeq(07-22H)}$	
31.4	0	10	2.1	75	75
50	0	10	2.2.1	75	75
22	0	10	2.2.2	75	75
15	0	10	2.2.3	75	75
50	0	10	2.2.4	75	75
50	0	10	2.2.5	75	75
15	0	10	2.2.6.1	75	75
15	0	10	2.2.6.2	75	75
248.4					

Pt de calcul	
19	20



Phase	Maximum $L_{Aeq(07-22H)}$	
2.1	60.4	60.9
2.2.1	80.0	80.5
2.2.2	78.0	78.5
2.2.3	74.2	74.7
2.2.4	76.4	76.9
2.2.5	74.2	74.7
2.2.6.1	74.2	74.7
2.2.6.2	76.4	76.9

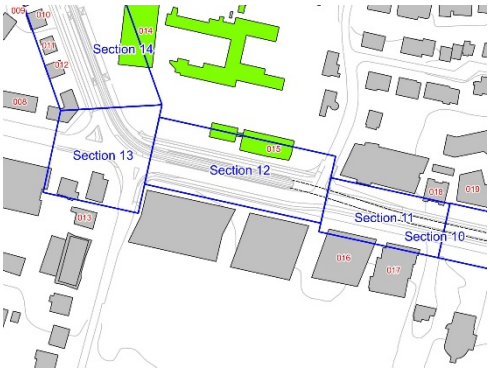
Phase	Dépassement $L_{Aeq(07-22H)}$		Pt de calcul 19	Pt de calcul 20	
2.1					
2.2.1	5.0	5.5	13	14	jours effectifs > 75 dB(A)
2.2.2	3.0	3.5	4	4	jours effectifs > 75 dB(A)
2.2.3					
2.2.4	1.4	1.9	6	7	jours effectifs > 75 dB(A)
2.2.5					
2.2.6.1					
2.2.6.2	1.4	1.9	2	2	jours effectifs > 75 dB(A)
		Tot.	25	27	jours effectifs > 75 dB(A)

2.6.7.6 Section 11

Tableau 16 : Résultats pour la Section 11

Section 11				Pt de calcul		
				16	17	18
Durée [jour]	CF Art 5 [dB]	CF Art 8 [dB]	Phase	Critère adapté $L_{Aeq(07-22H)}$		
31.4	0	10	2.1	75	75	75
50	0	10	2.2.1	75	75	75
22	0	10	2.2.2	75	75	75
15	0	10	2.2.3	75	75	75
50	0	10	2.2.4	75	75	75
50	0	10	2.2.5	75	75	75
15	0	10	2.2.6.1	75	75	75
15	0	10	2.2.6.2	75	75	75
248.4						

Pt de calcul		
16	17	18



Phase	Maximum $L_{Aeq(07-22H)}$		
2.1	60.7	60.8	63.0
2.2.1	80.2	80.3	82.6
2.2.2	78.1	78.2	80.6
2.2.3	74.4	74.5	76.8
2.2.4	76.6	76.7	79.0
2.2.5	74.4	74.5	76.8
2.2.6.1	74.4	74.5	76.8
2.2.6.2	76.6	76.7	79.0

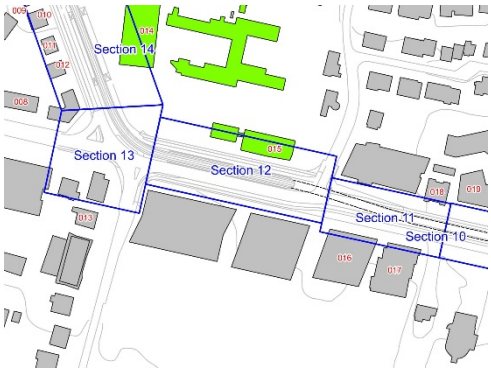
Phase	Dépassement $L_{Aeq(07-22H)}$			Pt de calcul 16	17	18	
2.1							
2.2.1	5.2	5.3	7.6	14	14	17	jours effectifs > 75 dB(A)
2.2.2	3.1	3.2	5.6	4	4	6	jours effectifs > 75 dB(A)
2.2.3			1.8			2	jours effectifs > 75 dB(A)
2.2.4	1.6	1.7	4.0	7	7	12	jours effectifs > 75 dB(A)
2.2.5			1.8			7	jours effectifs > 75 dB(A)
2.2.6.1			1.8			2	jours effectifs > 75 dB(A)
2.2.6.2	1.6	1.7	4.0	2	2	3	jours effectifs > 75 dB(A)
			Tot.	27	27	49	jours effectifs > 75 dB(A)

2.6.7.7 Section 12

Tableau 17 : Résultats pour la Section 12

Section 12				Pt de calcul
				15
Durée [jour]	CF Art 5 [dB]	CF Art 8 [dB]	Phase	Critère adapté $L_{Aeq(07-22H)}$
31.4	0	10	2.1	55
75	0	10	2.2.1	55
34	0	10	2.2.2	55
20	0	10	2.2.3	55
75	0	10	2.2.4	55
60	0	10	2.2.5	55
23	0	10	2.2.6.1	55
20	0	10	2.2.6.2	55
338.4				

Pt de calcul
15



Phase	Maximum $L_{Aeq(07-22H)}$
2.1	63.4
2.2.1	82.9
2.2.2	80.9
2.2.3	77.1
2.2.4	79.3
2.2.5	77.1
2.2.6.1	77.1
2.2.6.2	79.3

Phase	Dépassement $L_{Aeq(07-22H)}$	Pt de calcul 15	
2.1	8.4	8	jours effectifs > 55 dB(A)
2.2.1	27.9	50	jours effectifs > 55 dB(A)
2.2.2	25.9	25	jours effectifs > 55 dB(A)
2.2.3	22.1	12	jours effectifs > 55 dB(A)
2.2.4	24.3	50	jours effectifs > 55 dB(A)
2.2.5	22.1	33	jours effectifs > 55 dB(A)
2.2.6.1	22.1	14	jours effectifs > 55 dB(A)
2.2.6.2	24.3	12	jours effectifs > 55 dB(A)
	Tot.	204	jours effectifs > 55 dB(A)

Les sections 6 à 12 ont toutes un phasage de travaux identique : les sections 6 à 8 (depuis l'Est) et les sections 12 à 10 (depuis l'Ouest) vont progressivement cheminer vers la section 9, milieu de la tranchée couverte.

Ils correspondent à l'évolution progressive du front de chantier pour la construction des parois (en pieux forés) et de la dalle supérieure de la tranchée couvert / tunnel.

La durée totale des différentes phases de chantier par section va durer chaque fois plus que 240 jours ouvrables, soit plus que 365 jours calendriers : aucune correction de durée n'est donc considérée ici.

L'exposition aux bruits de chantier va rester similaire pendant toute la progression : seule la distance aux engins va faire que, logiquement vu les courtes distances et en fonction de celles-ci, les points de calculs seront plus ou moins exposés, avec une émergence qui se répète, à savoir que les phases de forage (2.2.1 pieux forés et 2.2.2 parois berlinoises) sont les plus impactantes avec même des dépassements allant jusqu'à 10 dB(A).

Une attention particulière doit être accordée à la section 12, la zone au niveau du CHL. Étant donné la sensibilité de ces bâtiments, les critères y sont 20 dB plus stricts, ce qui rend les dépassements encore plus significatifs : ils pourraient atteindre près de 28 dB(A).

Cela nécessitera un dimensionnement de protections antibruit plus important encore aux points trop proches et donc trop exposés. A cet endroit, on pourrait envisager des écrans « permanents » sur toute la durée de chantier en plaçant, par exemple, 2 niveaux de containers de bureaux de chantiers.

Les recommandations faites pour la Section 4 restent d'application et il est conseillé de les appliquer sur tout le chantier :

- Utiliser des foreuses et des pelles hydrauliques encore moins bruyantes que celles ici considérées ;
- Entourer les engins par des écrans de chantier amovibles acoustiquement isolants [DL_{SI}>30 dB(A)[8]] et absorbants [$DL_{RI,NRD}$> 0.7[9]] placés autour de la zone de chantier sur une hauteur de 4 m de haut pendant toute la durée des travaux;
- Adapter les horaires d'utilisation des engins de façon adéquate.

Suivant ces adaptations, il est raisonnable de penser que le chantier puisse respecter les recommandations d'application.

[8] Selon la norme ILNAS EN 1793-6
[9] Selon la norme ILNAS EN 1793-5

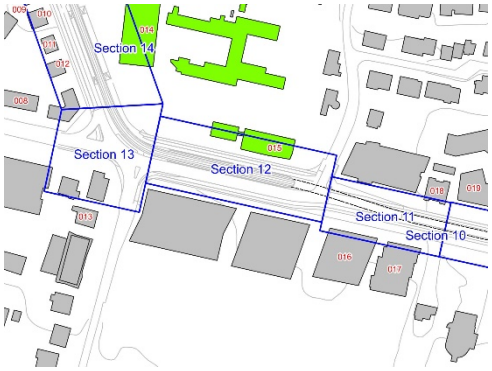
2.6.8 Section 13 – Tramway en surface

Tableau 18 : Résultats pour la Section 13

Section 13				Pt de calcul
				13
Durée [jour]	CF Art 5 [dB]	CF Art 8 [dB]	Phase	Critère adapté $L_{Aeq(07\text{-}22H)}$
90	10	10	2.8.1	85
80	10	10	2.8.2	85
170				

Phase	Maximum $L_{Aeq(07\text{-}22H)}$
2.8.1	73.3
2.8.2	74.8

Phase	Dépassement $L_{Aeq(07\text{-}22H)}$
2.8.1	
2.8.2	



Ce chantier spécifique respectera les recommandations fixées par le Règlement Grand-Ducal.

2.6.9 Section 14 – Tramway en surface

Tableau 19 : Résultats pour la Section 14

Section 14

Durée [jour]	CF Art 5 [dB]	CF Art 8 [dB]	Phase	Pt de calcul 2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14
				Critère adapté $L_{Aeq(07\text{-}22H)}$											
90	10	10	2.8.1	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	65
80	10	10	2.8.2	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	65
170															

Phase	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14
	Maximum $L_{Aeq(07\text{-}22H)}$											
2.8.1	81.1	76.0	70.6	59.4	51.5	66.0	70.5	76.2	73.8	73.7	75.7	93.2
2.8.2	82.5	77.6	72.4	61.0	53.0	67.5	72.1	77.8	75.5	75.3	77.3	94.2

Phase	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14
	Dépassement $L_{Aeq(07\text{-}22H)}$											
2.8.1												28.2
2.8.2												29.2

	Pt de calcul 14	
	33	jours effectifs > 65 dB(A)
	33	jours effectifs > 65 dB(A)
Tot.	66	jours effectifs > 65 dB(A)

La Section 14 se trouve également à proximité du CHL, ce qui impose des critères acoustiques plus stricts au niveau du point de calcul 14 : les dépassements sont très importants (jusqu'à 29 dB(A).

Encore une fois, les recommandations faites pour la Section 4 restent d'application et il est conseillé de les appliquer sur tout le chantier.

2.6.10 Section 15 – Tramway en surface

Tableau 20 : Résultats pour la Section 15

Section 15				Pt de calcul
				1
Durée [jour]	CF Art 5 [dB]	CF Art 8 [dB]	Phase	Critère adapté $L_{Aeq(07\text{-}22H)}$
60	15	10	2.9	90
60				

Phase	Maximum $L_{Aeq(07\text{-}22H)}$
2.9	60.4

Phase	Dépassement $L_{Aeq(07\text{-}22H)}$
2.9	

Ce chantier spécifique respectera les recommandations fixées par le Règlement Grand-Ducal.

2.7 Recommandations

Les recommandations ont été faites de façon spécifique à chaque phase de chantier (2.6.1 à 2.6.10) : nous en rappelons les grands principes :

- Utiliser des engins moins bruyants que ceux ici considérés (tout le chantier);
- Adapter les horaires d'utilisation des engins de façon adéquate (tout le chantier) ;
- Mettre des écrans « fixes » pendant toute la durée des chantiers respectifs pour protéger les zones les plus sensibles (exemple : au niveau du CHL) ;
- D'entourer les engins par des écrans de chantier « amovibles » acoustiquement isolants [DL_{SI}>30 dB(A)[10]] et absorbants [$DL_{RI,NRD}$> 0.7[11]] placés autour de la zone de chantier sur une hauteur de 4 m de haut pendant toute la durée des travaux;

Vu l'importance de certains dépassements, tant en durée qu'en niveau, un dimensionnement optimisé de protection antibruit pourrait même être envisagé.

2.8 Conclusions

Le chantier va effectivement avoir un impact important sur le bruit dans son environnement direct : il ne pourra pas se réaliser sans précaution.

Cependant, avec un dimensionnement adéquat de mesures de réduction de bruit, il devrait être possible de mieux respecter les recommandations du Règlement Grand-Ducal.

[10] Selon la norme ILNAS EN 1793-6
[11] Selon la norme ILNAS EN 1793-5

3. ETUDES DES INCIDENCES VIBRATOIRES DU CHANTIER

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

Dans le rapport « DM-vth-LU0407-RP2024-01752.pdf », les nuisances vibratoires liées à la circulation des tramways sur le futur tronçon ont été traitées. Le principe de génération de ces vibrations est rappelé en Figure 5.

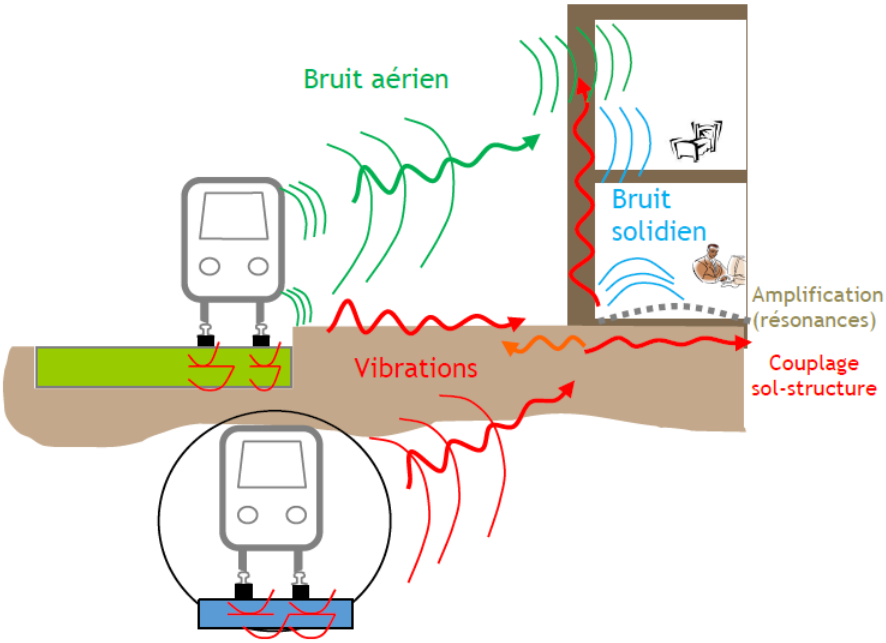


Figure 5 : Génération et propagation des vibrations au passage d'un matériel roulant

La réalisation des opérations de travaux lors de la construction du tronçon représente également une source de vibration et donc de nuisance pour les riverains et les infrastructures. Les sources vibratoires sont les engins de chantiers utilisés lors des différentes opérations. La propagation des vibrations et la réception dans les bâtiments suit le même principe que l'approche en exploitation liée à la circulation des tramways. La Figure 6 schématise ce principe.

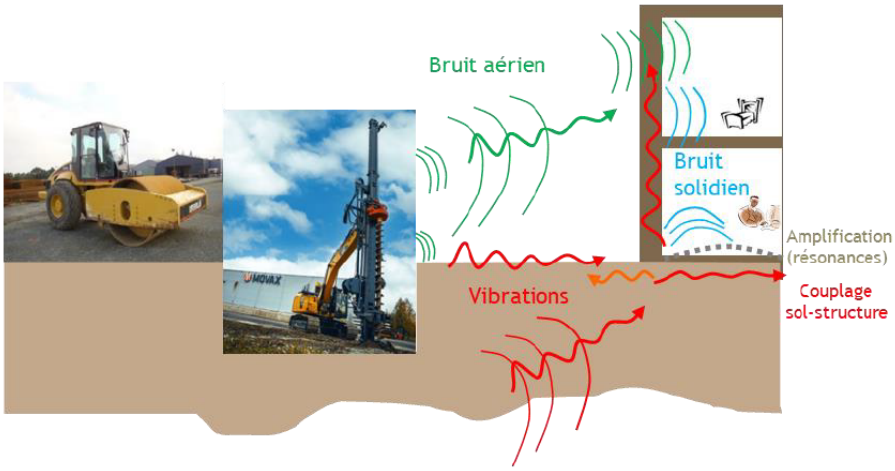


Figure 6 : Génération et propagation des vibrations lors d'opérations de travaux

3.2 Contexte règlementaire et normatif

Il n'existe pas de règlementations liées à l'impact vibratoire des travaux sur le confort riverain. L'utilisation de critères de confort liés à la circulation des trains comme la DIN 4150-2 pour le confort vibratoire et la VDI 2719 pour le bruit solidien, utilisés pour l'étude en phase exploitation, parait trop restrictive. L'échelle ci-dessous permet une analyse qualitative des niveaux de vibrations, permettant de positionner les niveaux obtenus sur une échelle de ressenti humain jusqu'au risque structurel pour les bâtiments.

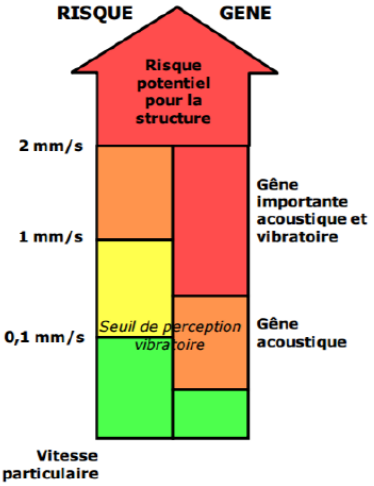


Figure 7 : Exemple d'échelle qualitative d'analyse du niveau vibratoire, issu de l'article[12]

Concernant l'hôpital et la potentielle présence d'appareils sensibles, aucun critère spécifique n'a été fourni. Nous proposons 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 21.

Tableau 21 : Critères VC pour les équipements sensibles

Critère de courbe	Vitesse µm/s (µin/s)	Description de l'utilisation
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.

[12] M. L. Alexis Bigot, «La diversité des sources vibratoires : les vibrations liées aux engins de chantier,» Acoustique et techniques N°64, 2011.

Ces vitesses vibratoires sont fournies en dBv réf 5e-8 m/s dans le tableau suivant :

Tableau 22 : Critères VC pour les équipements sensibles, équivalence en dBv réf 5e-8 m/s

Vitesse vibratoire [µm/s]	Niveau de vitesse vibratoire en dBv ref 5e-8m/s
100	66
50	60
25	54
13	48

Enfin, la circulaire du 23 juillet 1986 relative aux vibrations mécaniques émises dans l'environnement par les installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) propose des valeurs limites en-dessous desquels le risque structurel pour les bâtiments peut être écarté. Les limites sont fournies en fonction du type de sollicitation (vibration continue ou impulsionnelle).

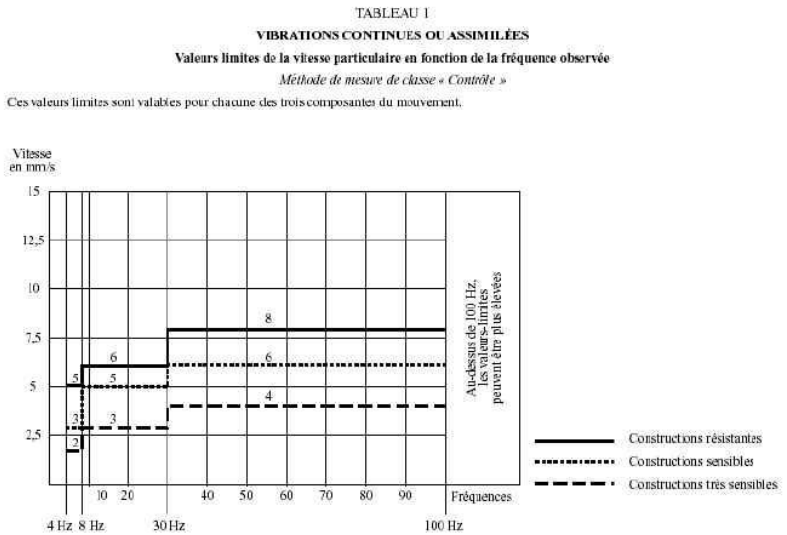


Figure 8 : Valeurs limites de niveau vibratoire selon l'arrêté du 23 juillet 1986, source continue

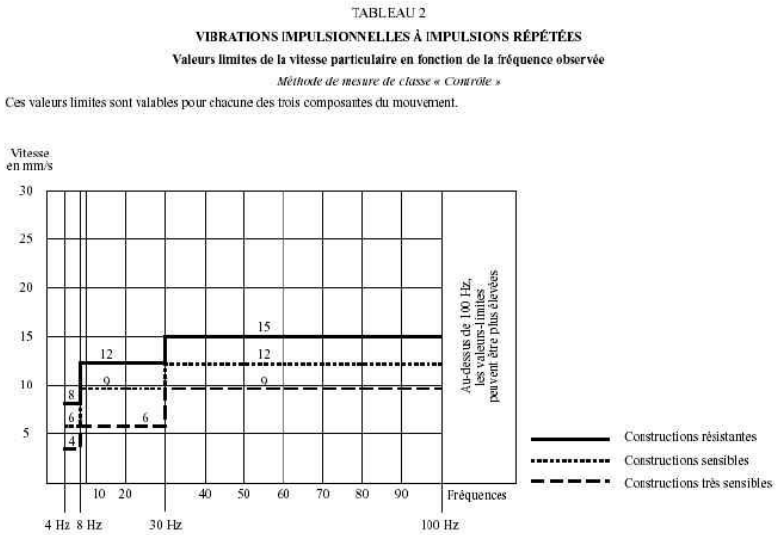


Figure 9 : Valeurs limites de niveau vibratoire selon l'arrêté du 23 juillet 1986, source impulsionnelle

Les repères suivants peuvent être retenus :

- Plage de perturbation équipement sensible, en fonction de la nature de l'équipement : [48 ; 60] dBv (réf 5e-8 m/s),
- Seuil de perception humaine : 0.1 mm/s, ou 66dBv (réf 5e-8 m/s),
- Seuil de forte gêne vibratoire : 2 mm/s, ou 92dBv (réf 5e-8 m/s),
- Seuil de risque pour la structure : 10 mm/s, ou 106dBv (réf 5e-8 m/s). Ce niveau est à comparer au niveau calculé **en seuil de bâtiment**.

Enfin, pour le bruit solidien la VDI 2719 fournit des critères de **confort** :

- Habitations : seuil de confort entre 30 et 40 dBA (réf 2e-5Pa),
- Bureaux : seuil de confort entre 40 et 50 dBA (réf 2e-5Pa).

3.3 Modélisation de l'impact vibratoire en phase travaux

3.3.1 Méthodologie

Toutes les opérations de travaux ne sont pas à risque. La première étape consiste donc à établir une liste des opérations pouvant entrainer des nuisances.

Une fois ces opérations identifiées, on distingue trois étapes dans la méthodologie d'estimation du niveau vibratoire et de bruit solidien dans un bâtiment dus aux opérations de travaux :

1. Calcul de l'excitation (terme source),
2. Calcul de la propagation des vibrations depuis le lieu des opérations 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).

Le résultat est présenté :

- En niveau maximum pour le confort vibratoire,
- En niveau RMS pour le bruit solidien, sur une hypothèse d'un facteur de crète de 4 (hypothèse guide FTA[13]).

3.3.1.1 Terme source

Pour le terme source, les valeurs proposées dans le guide FTA sont utilisées.

Le guide FTA propose les valeurs sources suivantes :

Table 7-4 Vibration Source Levels for Construction Equipment

Equipment		PPV at 25 ft, in/sec	Approximate Lv* at 25 ft
Pile Driver (impact)	upper range	1.518	112
	typical	0.644	104
Pile Driver (sonic)	upper range	0.734	105
	typical	0.17	93
Clam shovel drop (slurry wall)		0.202	94
Hydromill (slurry wall)	in soil	0.008	66
	in rock	0.017	75
Vibratory Roller		0.21	94
Hoe Ram		0.089	87
Large bulldozer		0.089	87
Caisson drilling		0.089	87
Loaded trucks		0.076	86
Jackhammer		0.035	79
Small bulldozer		0.003	58

* RMS velocity in decibels, VdB re 1 micro-in/sec

Figure 10 : Source vibratoire des engins de chantier proposé par le guide FTA

N.B : l'effort vibratoire généré par un engin dépend du sol sur lequel il travaille. Ces termes FTA, applicables de manière générique quel que soit le sol, sont donc des **ordres de grandeurs** et **ne permettent pas de réaliser un calcul prédictif exact des niveaux attendus**.

[13] FTA, Transit Noise and Vibration Impact Assessment Manual, 2018.

3.3.1.2 *Terme propagatif*

A partir du terme source, la réponse du sol et la propagation des vibrations jusqu'aux bâtiments est calculée à l'aide de la formulation simplifiée du guide FTA, dont les paramètres sont recalés via une modélisation du sol de la zone sur le logiciel Mefissto.

Le calcul du transfert vibratoire sur Mefissto est utilisé afin de recaler l'exposant de 1.5 proposé dans la formule d'atténuation du guide FTA, **cette valeur dépendant du type de sol** :

$$PPV_{equip} = PPV_{ref} \times \left(\frac{25}{D}\right)^{1.5} \qquad \textbf{Eq. 7-2}$$

where:

PPV_{equip} = the peak particle velocity of the equipment adjusted for distance, in/sec

PPV_{ref} = the source reference vibration level at 25 ft, in/sec

D = distance from the equipment to the receiver, ft

Figure 11 : Modèle de propagation des vibrations proposé dans le guide FTA

Plus de détails concernant cette démarche sont indiqués en annexe.

3.3.1.3 *Terme immission*

Les données établies lors du projet européen RIVAS sont utilisées pour le terme immission. Ces données permettent 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.

Les types de bâtiments présents dans la zone sont donc analysés afin d'utiliser les fonctions de transfert adéquates.

La terme source pour les engins de chantier n'est pas défini en fréquence. Une approche conservative consistera donc à appliquer l'effort généré par l'engin sur toutes les fréquences.

Afin de ne pas être trop conservatif, une valeur d'amplification moyenne par type d'habitation est proposée.

Le niveau de vitesse vibratoire en dBv réf 5e-8m/s est obtenu en additionnant la valeur dans la colonne « confort vibratoire » au niveau de vitesse vibratoire en seuil bâtiment.
Le niveau de pression acoustique en dBA réf 2e-5Pa est obtenu en additionnant la valeur dans la colonne « bruit solidien » au niveau de vitesse vibratoire en seuil bâtiment. Ce transfert inclue l'effet de la pondération A.

Tableau 23 : Facteur transfert vibratoire moyen des bâtiments (TF2 + TF3 + émission bruit solidien le cas échéant), confort vibratoire (dBv) et bruit solidien (dBA)

	Confort vibratoire	Bruit solidien
Immeuble haut	10	-35
Immeuble bas	14	-27

Plus de détails concernant l'établissement de ces valeurs sont présentés en annexe.

3.3.2 Identification des opérations à risque

Le planning de chantier décrit en annexe 4.3 permet d'identifier les opérations qui présentent un risque de générer des niveaux vibratoires importants. Ces opérations sont identifiées pour la configuration en surface et en tranchée couverte. Le nom des différentes sections est défini en Figure 12.

Figure 12 : Section de chantier, tronçon Arlon

L'étude couvre principalement les sections 6 à 15 (les sections 1 à 5 ont été couvertes de manière qualitative lors de l'étude précédente).
Toutefois les estimations des risques de gène faites dans la rue Federspiel sont applicables pour l'estimation des risques au droit des sections 1 à 5, à savoir :
Les courbes d'estimation de risque (niveau / distance) présentées dans le paragraphe 4.3.1. (risque structurel bâtiment / nuisance riverains) sont donc utilisables dans les sections 1 à 5 (pour immeubles haut et immeubles bas).

3.3.2.1 Configuration surface

Les opérations de chantier de la zone en surface sont axées sur les sections les plus sensibles, notamment les sections 13, 14 et 15.
Les bâtiments les plus sensibles pour la zone en surface sont :

- L'hôpital, donnant sur la rue Federspiel (maternité),
- Les immeubles bas d'habitations.

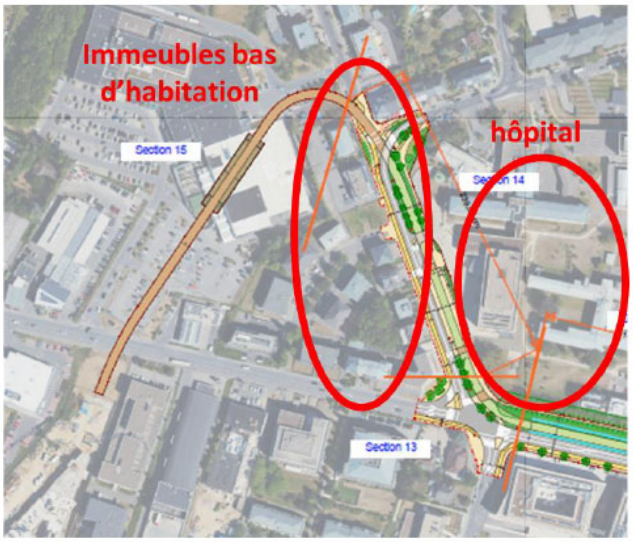


Figure 13 : Configurations critiques, zone surface

Les opérations pour les voies en surface sont :

- Terrassement, environ 1 à 2m en dessous du niveau actuel,
- Compactage,
- Pose de la dalle bêton et de la voie.

Les opérations pouvant générer des vibrations importantes sont :

- L'opération de terrassement (creusage),
- L'opération de compactages en fonction des engins utilisés,
- L'utilisation ponctuelle de brise roche hydraulique sur les parties très dures.

Le type de compacteur utilisé n'a pas été communiqué, l'étude sera donc menée pour un compacteur à rouleaux vibrants, générant potentiellement d'importantes vibrations dans le sol.

Figure 14 : Exemple de compacteur à rouleaux vibrants

De même, les engins utilisés pour les opérations de terrassement ne sont pas précisés dans le phasage des travaux . Pour cette étude, l'utilisation d'un bulldozer et ponctuellement d'un brise roche hydraulique a été considérée (forte probabilité).

3.3.2.2 Configuration tranchée couverte

Les opérations de chantier de la zone en tranchée couverte concernent les sections 6 à 12.
Les bâtiments les plus sensibles pour la zone tranchée couverte sont :

- L'hôpital situé à l'Ouest de la route d'Arlon,
- Les immeubles bas d'habitations situés en milieu de tronçon.

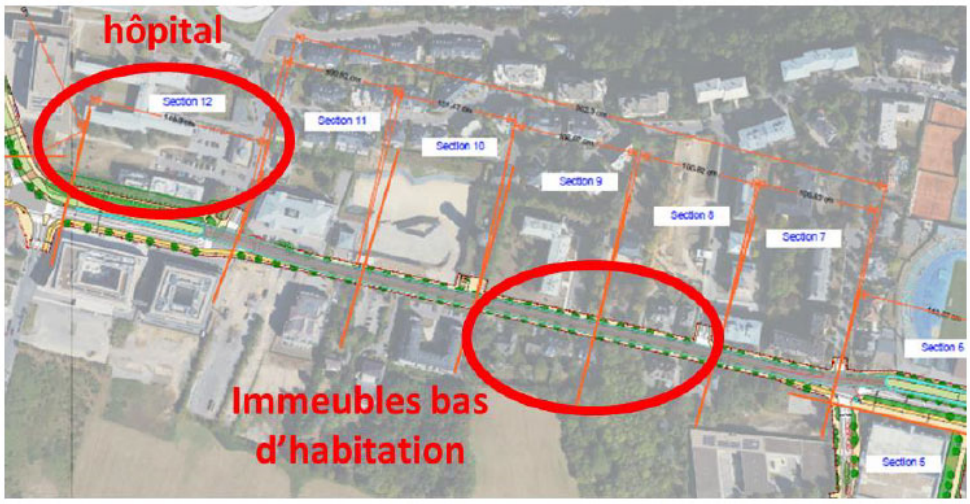


Figure 15 : Configurations critiques, zone tranchée couverte

Les opérations pour les voies en tranchée couverte sont :

- Pré-terrassement,
- Forage des pieux, 19 m de profondeur : opération de forage dans les grés du Luxembourg, sol relativement dur,
- Forage et installation des profilés métalliques des parois berlinoises ; 9 m de profondeur : **confirmation qu'aucune opération de battage ou vibrofonçage ne seront utilisées**,
- Terrassement jusqu'au niveau de la dalle supérieure,
- Coulage de la dalle supérieure,
- Terrassement en taupe et coulage de la dalle inférieure.

Les opérations pouvant générer des vibrations importantes sont :

- L'opération de forage dans les grés du Luxembourg,
- L'opération de terrassement (creusage),
- L'utilisation ponctuelle de brise roche hydraulique sur les parties très dures lors du terrassement.

3.3.3 Résultats

Pour chaque zone :

Les résultats sont fournis dans un premier temps en seuil bâtiment afin de comparer les valeurs aux seuils de risque structurel.

Les résultats sont fournis dans un second temps dans les bâtiments, en fonction de la distance entre le bâtiment et la source vibratoire (engin de chantier) :

- Niveau vibratoire maximum au centre plancher,
- Niveau de pression acoustique RMS.

N.B : les cas brise-roches, bulldozer et forage présentent les mêmes résultats, les courbes sont donc superposées.

3.3.3.1 Zone en surface

La zone analysée concernant les opérations de chantier en surface est la rue Federspiel.

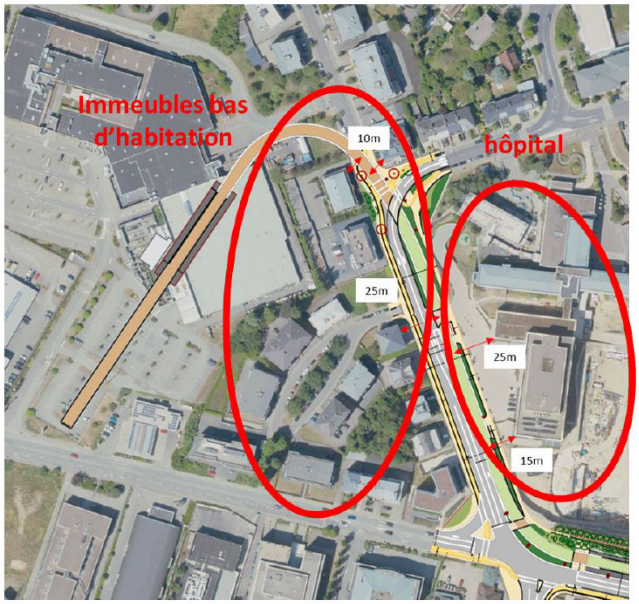


Figure 16 : Zone « voie en surface » - Rue Federspiel

3.3.3.1.1 Niveau en seuil bâtiment – risque structurel bâtiment

Les niveaux seuils bâtiments sont bien inférieurs aux seuils de risques structurels de 106 dBv réf 5e-8m/s. Cette limite est à comparer au niveau PPV (le niveau RMS est fourni pour information). Les niveaux sont fournis en seuil des bâtiments à 10 m :

Tableau 24 : Niveau seuil bâtiment à 10 m, route d'Arlon

	Seuil bâtiment, à 10 m de la source	
Equipement	**PPV**	**RMS**
Compacteur vibrant	98.4	86.4
Brise roche hydraulique	91.0	78.9
Bulldozer	91.0	78.9
Camion chargé	89.6	77.6

3.3.3.1.2 Niveau dans les bâtiments – nuisances riverains

Les résultats sont affichés pour l'hôpital et les bâtiments d'habitations comme indiqué en .

Bâtiment d'hôpital, immeuble haut

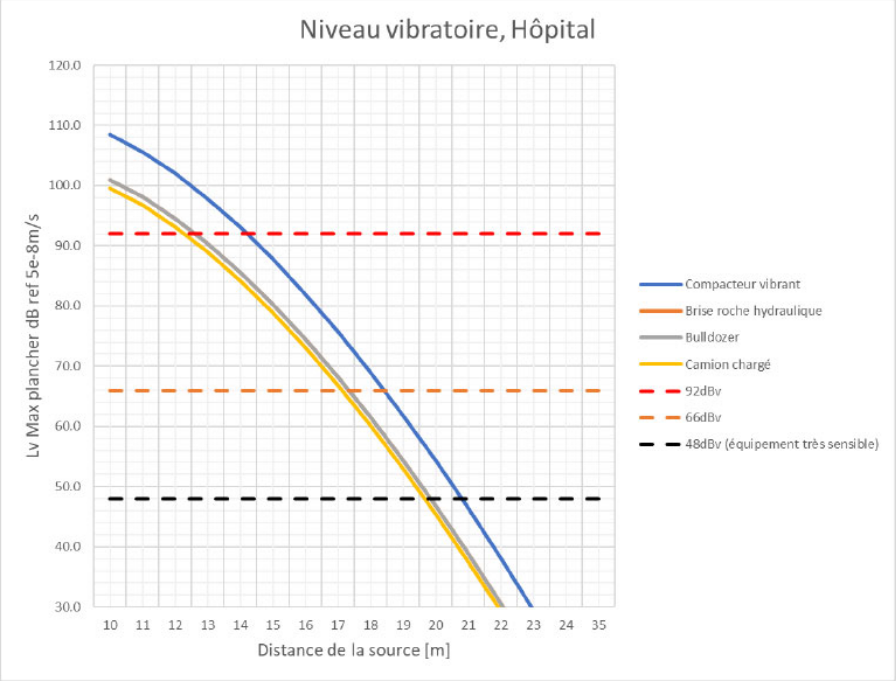


Figure 17 :Niveaux vibratoires max (PPV) en fonction de la distance (niveau centre plancher) - Hôpital

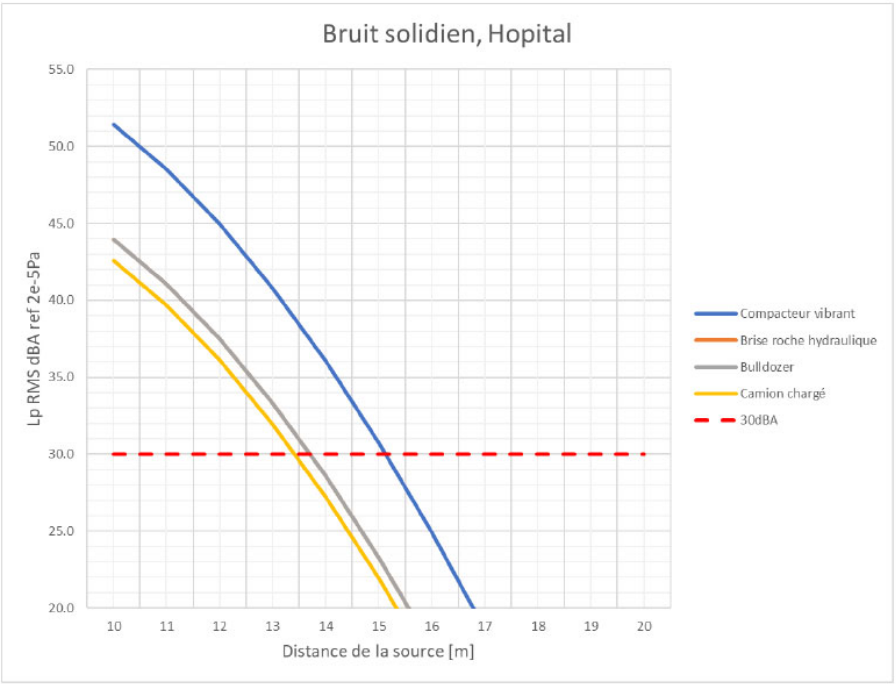


Figure 18 : Niveaux de pression acoustique (RMS) en fonction de la distance (bruit solidien dans bâtiments) - Hôpital

Pour l'hôpital, les opérations de chantiers au niveau de l'angle le plus proche (15 m) représentent les opérations les plus critiques :

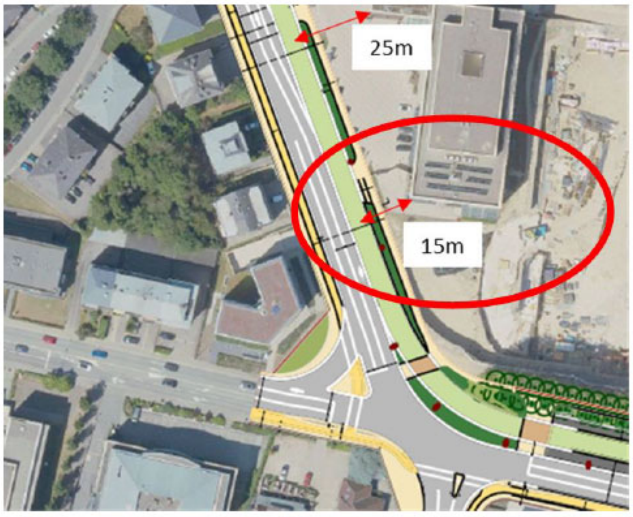


Figure 19 : Zone critique hôpital rue Federspiel

<u>Pour le confort vibratoire :</u>
Pour cette zone, les différentes opérations génèrent ponctuellement des vibrations entre 80 dBv et 88 dBv réf 5e-8 m/s, niveau fortement perceptible, provoquant des nuisances. Ces valeurs restent toutefois inférieures au seuil de très forte gêne (92 dBv réf 5e-8 m/s). Il est rappelé que les niveaux calculés ici sont des niveaux maximums et non des niveaux moyens.

<u>Pour les équipements sensibles :</u>
Concernant la potentielle présence d'équipement sensibles dans l'hôpital, les niveaux sont également très au-dessus du critère applicable aux équipements les plus sensibles pour ce bâtiment (48dBv réf 5e-8 m/s). Il est donc recommandé de vérifier la présence de ce type d'équipement dans les bâtiments de l'hôpital situés au plus proche des travaux.

<u>Pour le bruit solidien :</u>
Toujours pour ces bâtiments, le niveau moyen de bruit solidien de 32 dBA réf 2e-5Pa est très proche du seuil de confort usuel de 30 dBA : pas de risque de nuisance concernant le bruit solidien identifié.

Les niveaux décroient rapidement et un éloignement au-delà de 20 m devrait permettre de faire redescendre les niveaux sous les seuils de perception humaine. Cette distance critique peut être repoussée à 25 m concernant le risque de perturbation d'équipements sensibles.

Les opérations sur ce secteur au plus proche devraient être limitées dans le temps, limitant également les nuisances pour l'hôpital.

Il est important de noter que l'opération critique est l'opération de compactage, considérée ici avec un **compacteur vibrant**. L'utilisation d'un compacteur non vibrant, si techniquement acceptable pour réaliser les opérations, est donc fortement recommandée.

Bâtiment d'habitation, immeuble bas

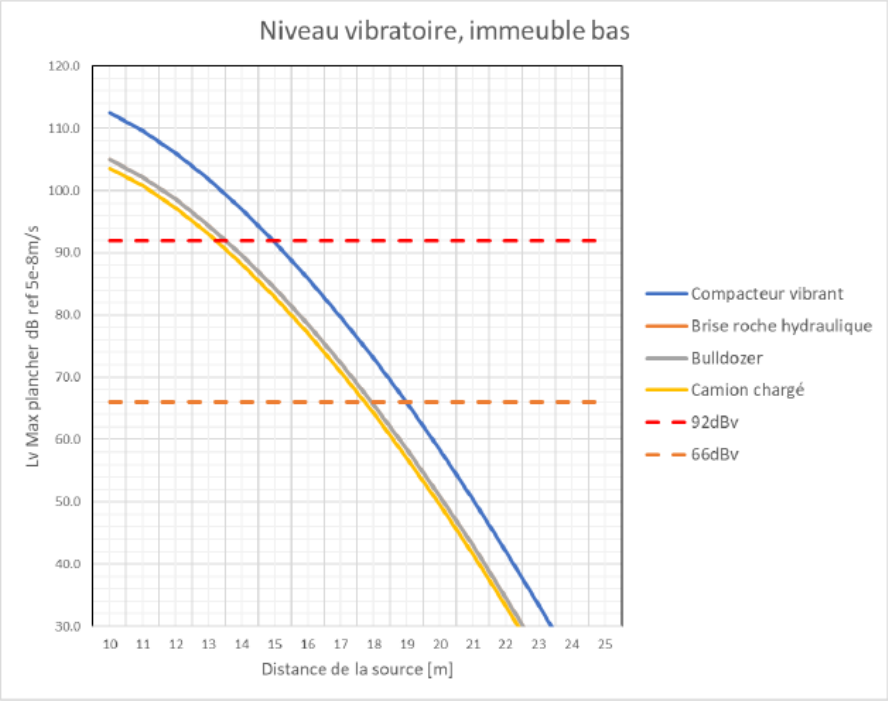


Figure 20 : Niveaux vibratoires max (PPV) en fonction de la distance (niveau centre plancher) – Immeuble bas

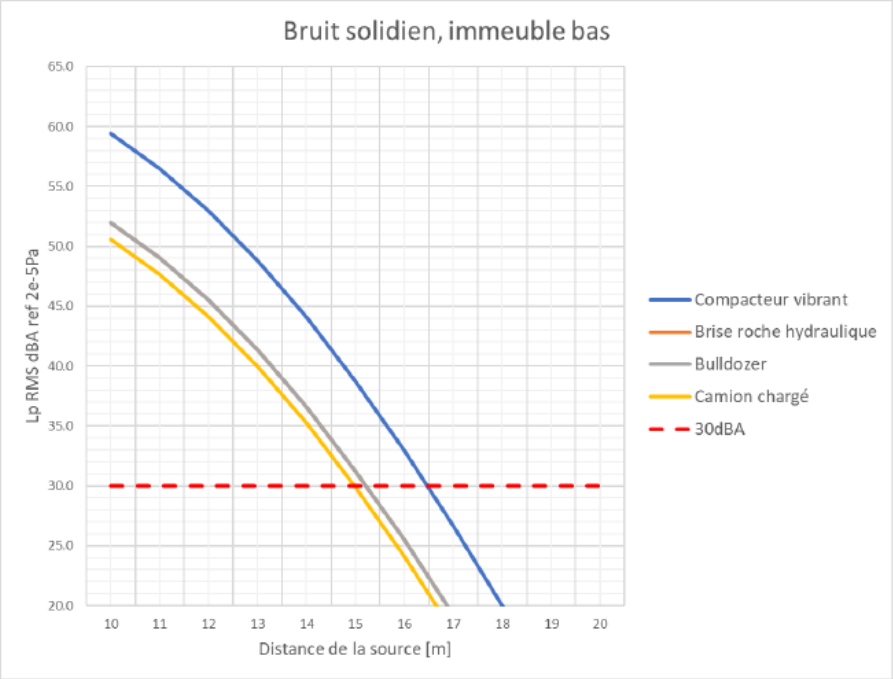


Figure 21 : Niveaux de pression acoustique (RMS) en fonction de la distance (bruit solidien dans bâtiments) – Immeuble bas

Aucun risque de nuisance identifié pour les bâtiments situés à plus de 20 m du chantier.
Un risque important de nuisance est toutefois identifié pour les quelques immeubles situés au plus proche du chantier :

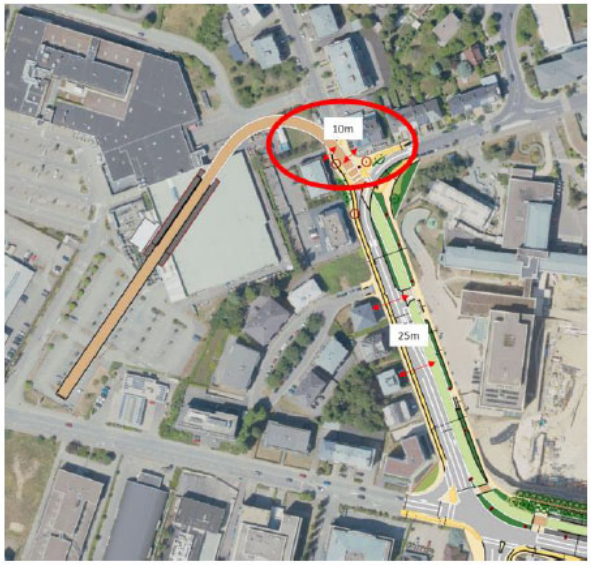


Figure 22 : Zones critiques immeuble bas d'habitation rue Federspiel

<u>Pour le confort vibratoire et le bruit solidien :</u>
Les niveaux estimés max à plus de 110 dBv réf 5e-8m/s et 60 dBA réf 2e-5 Pa vont générer de très forts gènes. Ces niveaux sont estimés à l'intérieur des pièces, il est important de noter que les niveaux en seuil sont beaucoup plus bas (voir 3.3.3.2.1), n'indiquant pas de risque pour la tenue structurelle des immeubles.

Les opérations sur le secteur proche devraient être limitées dans le temps, limitant également les nuisances pour ces quelques immeubles.

L'opération critique est l'opération de compactage, considérée ici avec un **compacteur vibrant**. L'utilisation d'un compacteur non vibrant, si techniquement acceptable pour réaliser les opérations, est donc fortement recommandée.

3.3.3.2 Zone en tranchée couverte

La zone analysée concernant les opérations de chantier pour la tranchée couverte est la route d'Arlon.

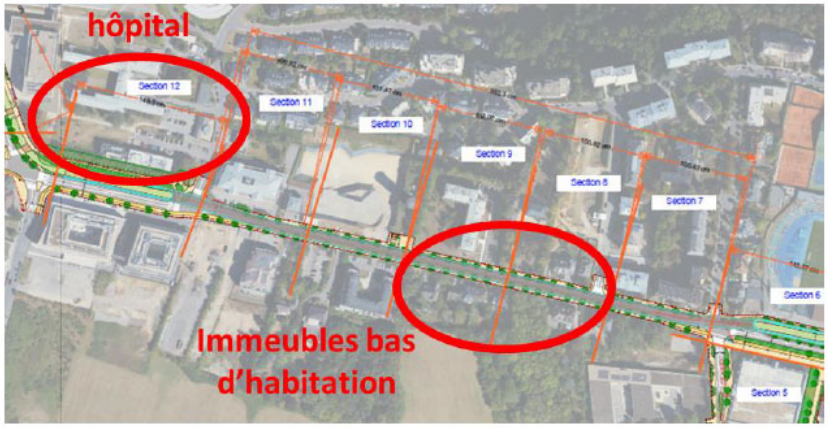


Figure 23 : Zone « voie en tranchée couverte », route d'Arlon

3.3.3.2.1 Niveau en seuil bâtiment – risque structurel bâtiment

Les niveaux en seuil bâtiment sont bien inférieurs aux seuils de risques structurels de 106 dBv réf 5e-8m/s. Cette limite est à comparer au niveau PPV (le niveau RMS est fourni pour information). Les niveaux sont fournis en seuil des bâtiments à 10 m :

Tableau 25 : Niveau seuil bâtiment à 10 m, route d'Arlon

	Seuil bâtiment, à 10m de la source	
Equipement	**PPV**	**RMS**
Brise roche hydraulique	90.5	78.5
Bulldozer	90.5	78.5
Camion chargé	89.1	77.1
Forage	90.5	78.5

3.3.3.2.2 Niveau dans les bâtiments – nuisances riverains

Les résultats sont affichés pour l'hôpital et les bâtiments bas d'habitations comme indiqué en

Bâtiment d'hôpital, immeuble haut

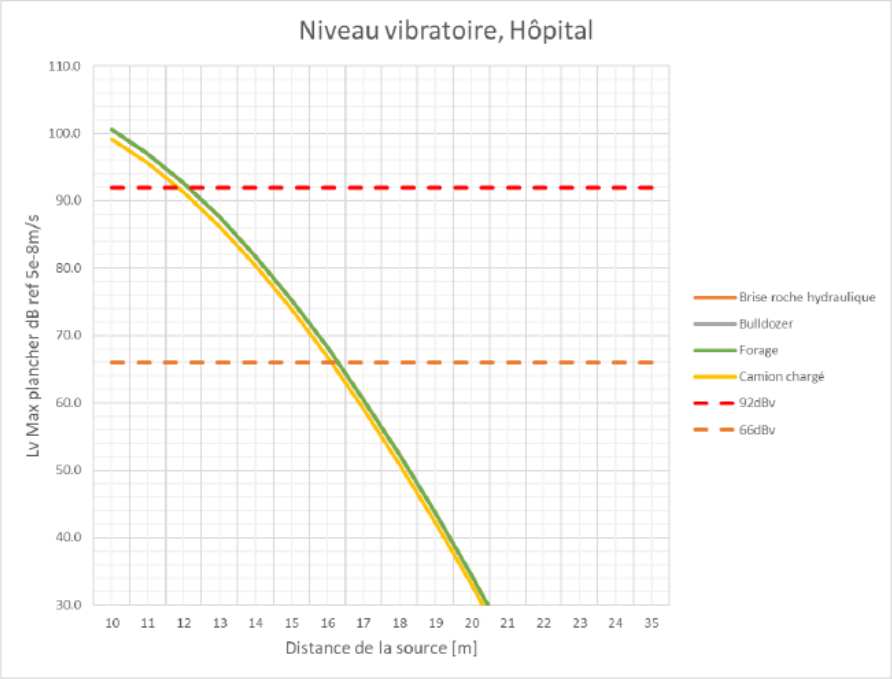


Figure 24 :Niveaux vibratoires max (PPV) en fonction de la distance (niveau centre plancher) - Hôpital

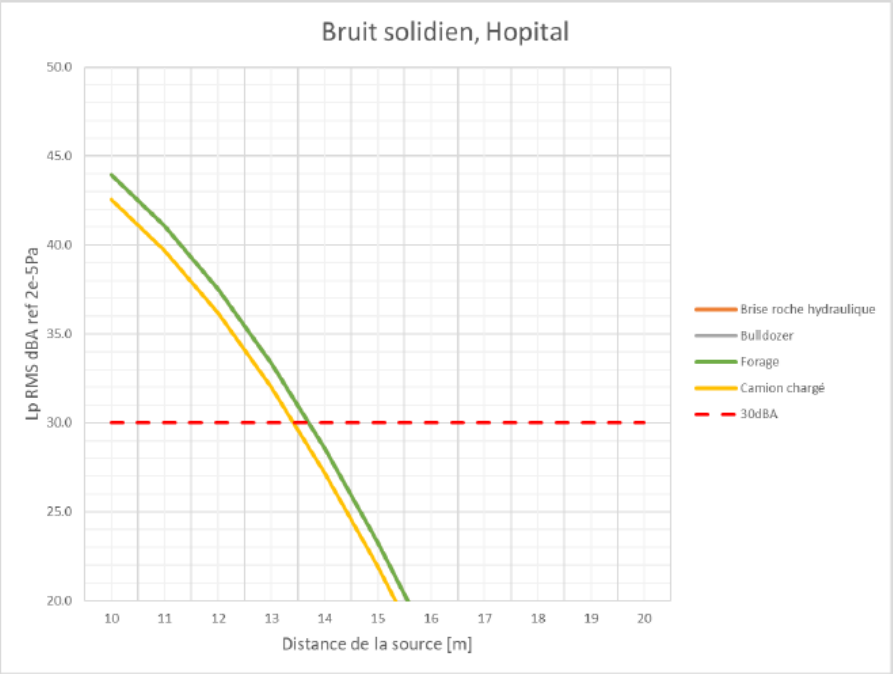


Figure 25 : Niveaux de pression acoustique (RMS) en fonction de la distance (bruit solidien dans bâtiments) - Hôpital

Concernant la partie de l'hôpital route d'Arlon, le bâtiment étant situé à une trentaine de mètre du chantier, **aucun risque de nuisance vibratoire ou bruit solidien n'est identifié pour les travaux dans cette zone**.

Bâtiment d'habitation, immeuble bas

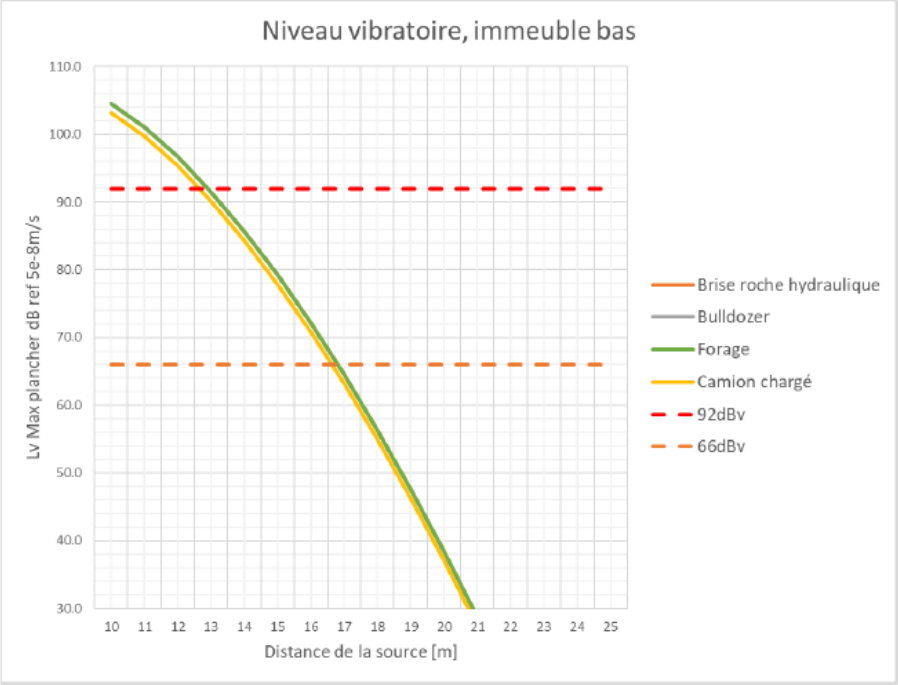


Figure 26 : Niveaux vibratoires max (PPV) en fonction de la distance (niveau centre plancher) – Immeuble bas

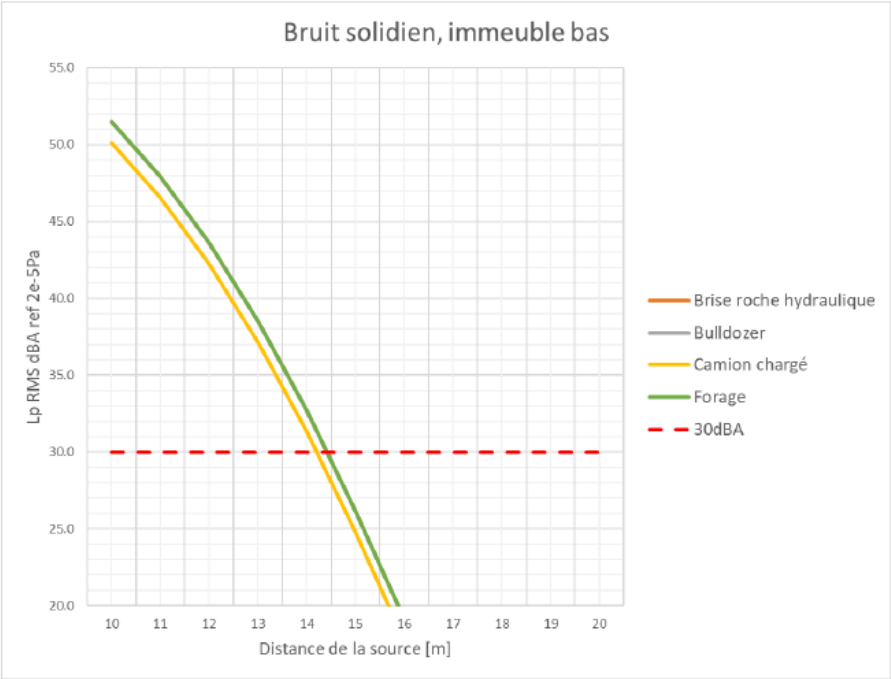


Figure 27 : Niveaux de pression acoustique (RMS) en fonction de la distance (bruit solidien dans bâtiments) – Immeuble bas

Pour le confort vibratoire :
Pour les immeubles bas d'habitations situés à environ 15 m, les différentes opérations génèrent ponctuellement des vibrations de 80 dBv réf 5e-8 m/s, niveau fortement perceptible par les riverains, **provoquant des nuisances**. Ces valeurs restent toutefois très inférieures au seuil de très forte gêne (92 dBv réf 5e-8 m/s). Il est rappelé que les niveaux calculés ici sont des niveaux maximums et non des niveaux moyens.

Pour le bruit solidien :
Toujours pour ces bâtiments, le niveau moyen de bruit solidien est inférieur au seuil de confort usuel de 30 dBA : pas de risque de nuisance vibratoire identifié.

Enfin, pour les bâtiments route d'Arlon situés à plus de 20 m du chantier, aucun risque de nuisance vibratoire ou bruit solidien n'est identifié.

3.4 Conclusions

En bilan, les niveaux sont affichés en bâtiment à 15 m et 20 m de la source vibratoire.

Rue Federspiel :

Tableau 26 : Niveau maximal à 15 et 20 m de la source, rue Federspiel

	Niveau à 15m		Niveau à 20m	
	Confort vibratoire, niveau max en dBv ref 5e-8m/s	Bruit solidien, niveau RMS en dBA ref 2e-5Pa	Confort vibratoire, niveau max en dBv ref 5e-8m/s	Bruit solidien, niveau RMS en dBA ref 2e-5Pa
Immeuble haut (hôpital)	87.8	30.8	54.3	Négligeable
Immeuble bas (habitations)	91.8	38.8	58.8	Négligeable

Route d'Arlon :

Tableau 27 : Niveau maximal à 15 et 2 m de la source, route d'Arlon

	Niveau à 15m		Niveau à 20m	
	Confort vibratoire, niveau max en dBv ref 5e-8m/s	Bruit solidien, niveau RMS en dBA ref 2e-5Pa	Confort vibratoire, niveau max en dBv ref 5e-8m/s	Bruit solidien, niveau RMS en dBA ref 2e-5Pa
Immeuble haut (hôpital)	75.3	18.2	34.4	Négligeable
Immeuble bas (habitations)	79.3	26.2	38.4	Négligeable

La méthode proposée par le guide FTA, corrigée via un modèle de sol multicouche réalisé sur le logiciel Mefissto, permet de mettre en évidence :

- Des niveaux en seuil bâtiment inférieurs aux seuils de risque structurel
- Des **niveaux vibratoires importants ponctuellement** pour les bâtiments situés à moins de 15 m des opérations. **La décroissance relativement forte des niveaux avec la distance permet de prévoir des niveaux faibles au-delà de 20 m**.
- Un point d'attention particulier est à porter concernant le **bâtiment de maternité** dont une partie est située proche du chantier (15 m). **Pour ce type de bâtiment, il est recommandé de vérifier la présence d'équipements sensibles pour les parties situées au plus proche des travaux**.

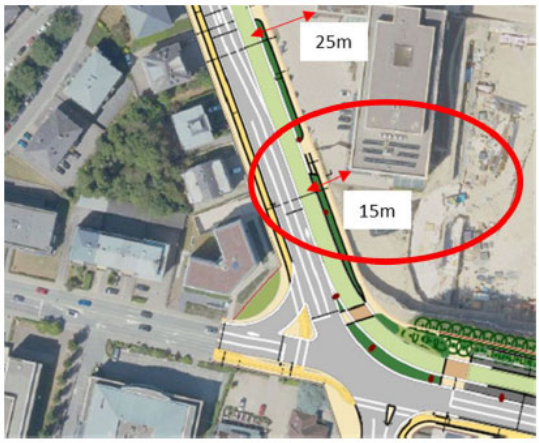


Figure 28 : Zone critique hôpital rue Federspiel

Les bâtiments d'habitation rue Federspiel situés à moins de 10m du chantier représentent également une zone à fort risque de nuisance :

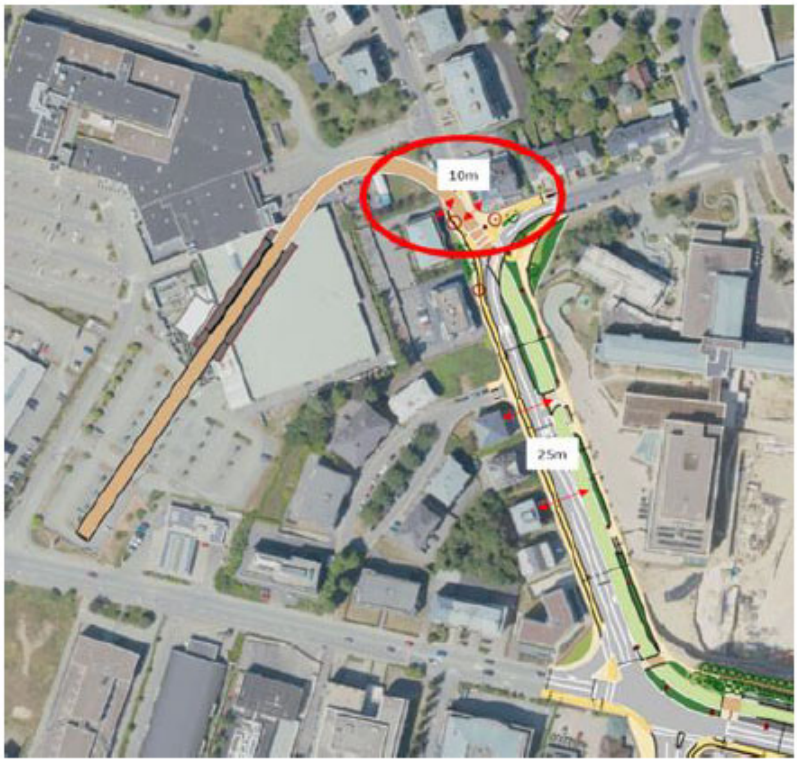


Figure 29 : Zones critiques immeuble bas d'habitation rue Federspiel

L'opération de compactage prévue sur le tronçon de voie en surface rue Federspiel, simulée ici avec un compacteur vibrant, représente l'opération la plus sollicitant. **Un compactage réalisé avec un compacteur non vibrant permettrait de faire diminuer ces niveaux max**.

Il est toutefois important de rappeler que ces simulations ont été réalisées à partir de données de sollicitations génériques issues du guide FTA avec certaines hypothèses. **Les valeurs obtenues sont donc des ordres de grandeur types**.

Il est donc nécessaire de mettre en œuvre un monitoring vibratoire en phase chantier afin de vérifier les niveaux vibratoires en temps réel et si nécessaire de limiter / adapter les sollicitations.

4. ANNEXES

4.1 Localisation et numérotation des bâtiments étudiés

LUXTRAM

Etude acoustique du tramway
de Luxembourg - Tronçon F

Localisation des points de calculs
Zone 1

Situation actuelle

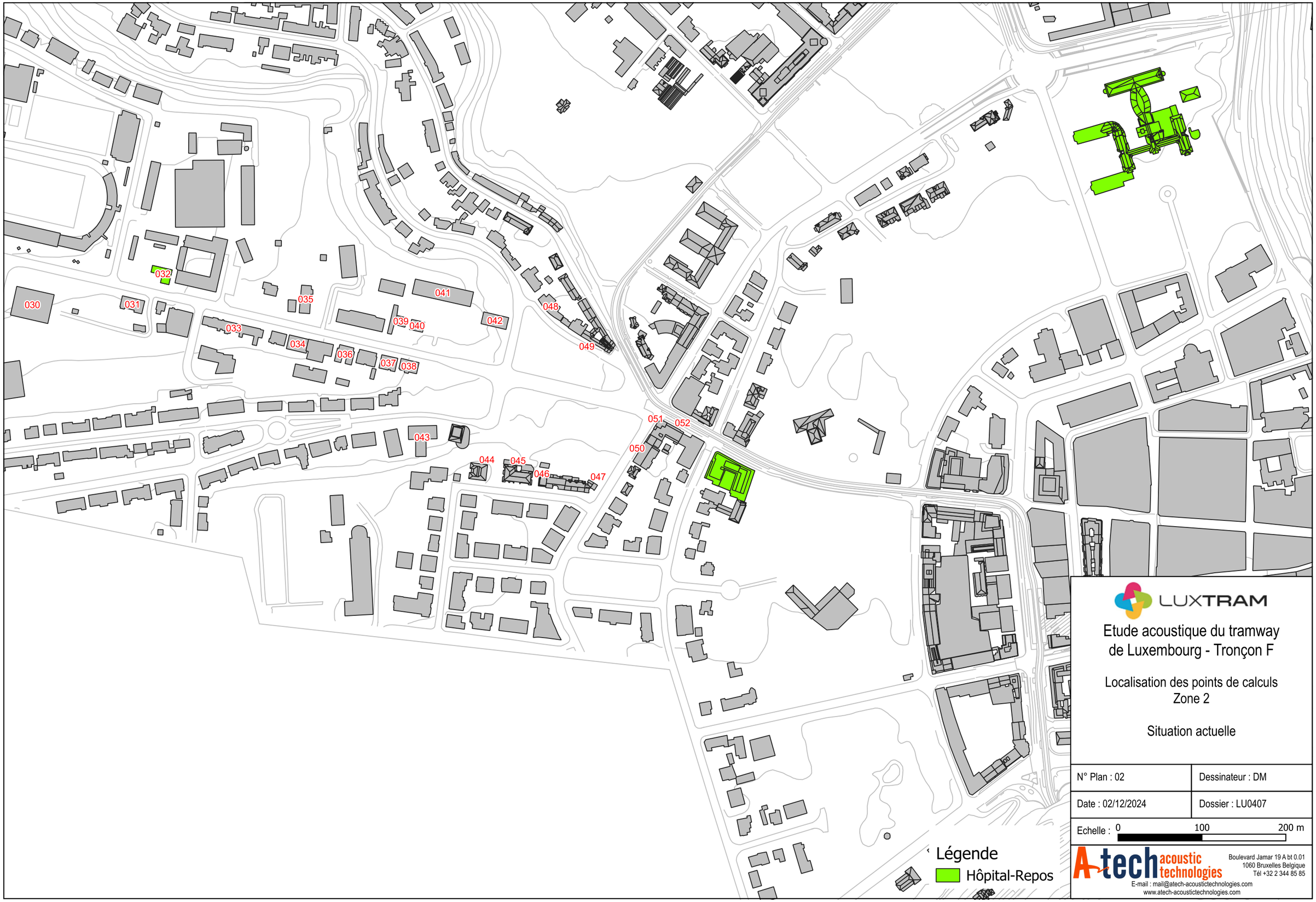
N° Plan : 01	Dessinateur : DM
Date : 02/12/2024	Dossier : LU0407

Echelle : 0 100 200 m

Légende

Hôpital-Repos

A-tech acoustic technologies
Boulevard Jamar 19 A bt 0.01
1060 Bruxelles Belgique
Tél +32 2 344 85 85
E-mail : mail@atech-acoustictechnologies.com
www.atech-acoustictechnologies.com



LUXTRAM

Etude acoustique du tramway de Luxembourg - Tronçon F

Localisation des points de calculs
Zone 2

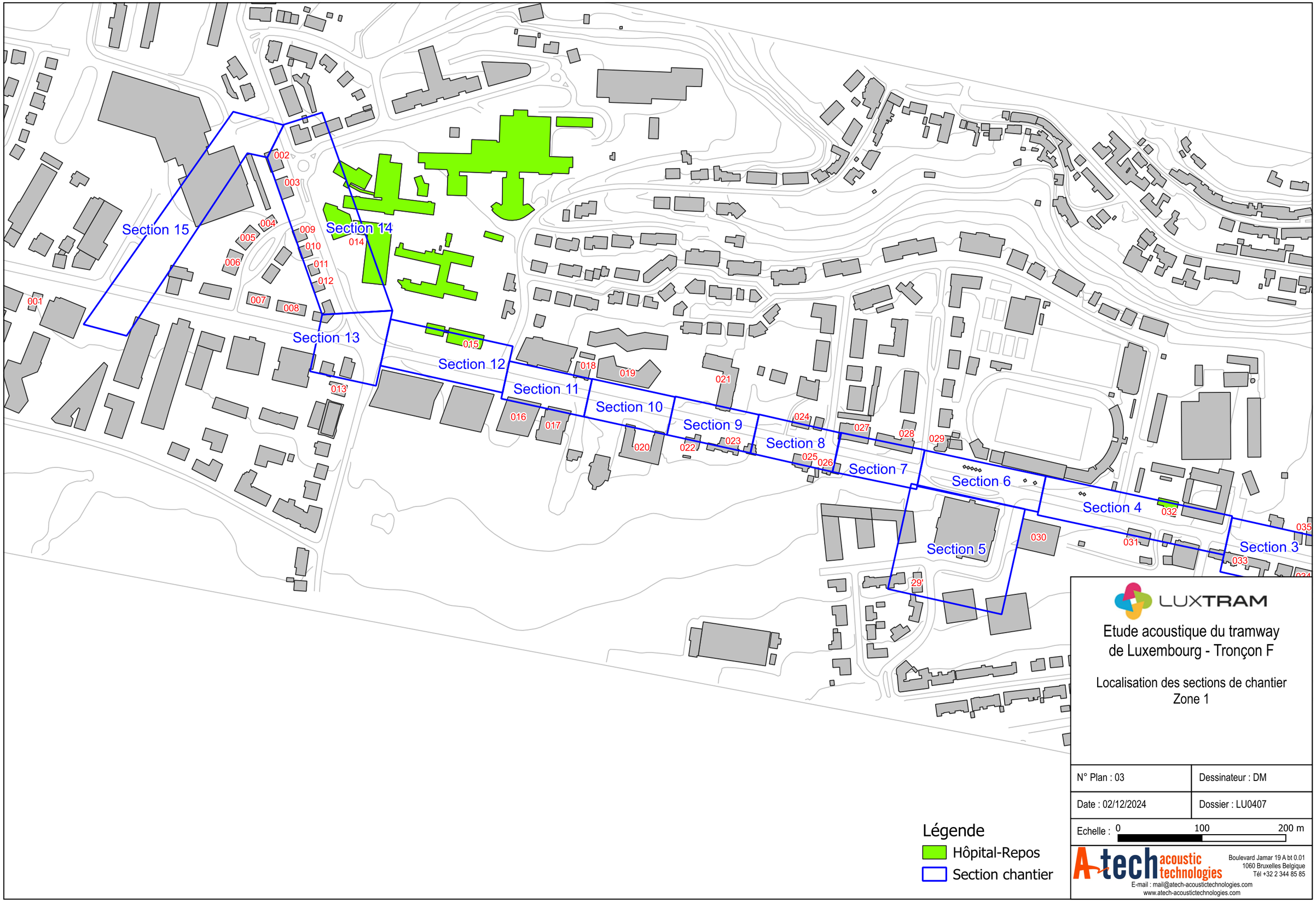
Situation actuelle

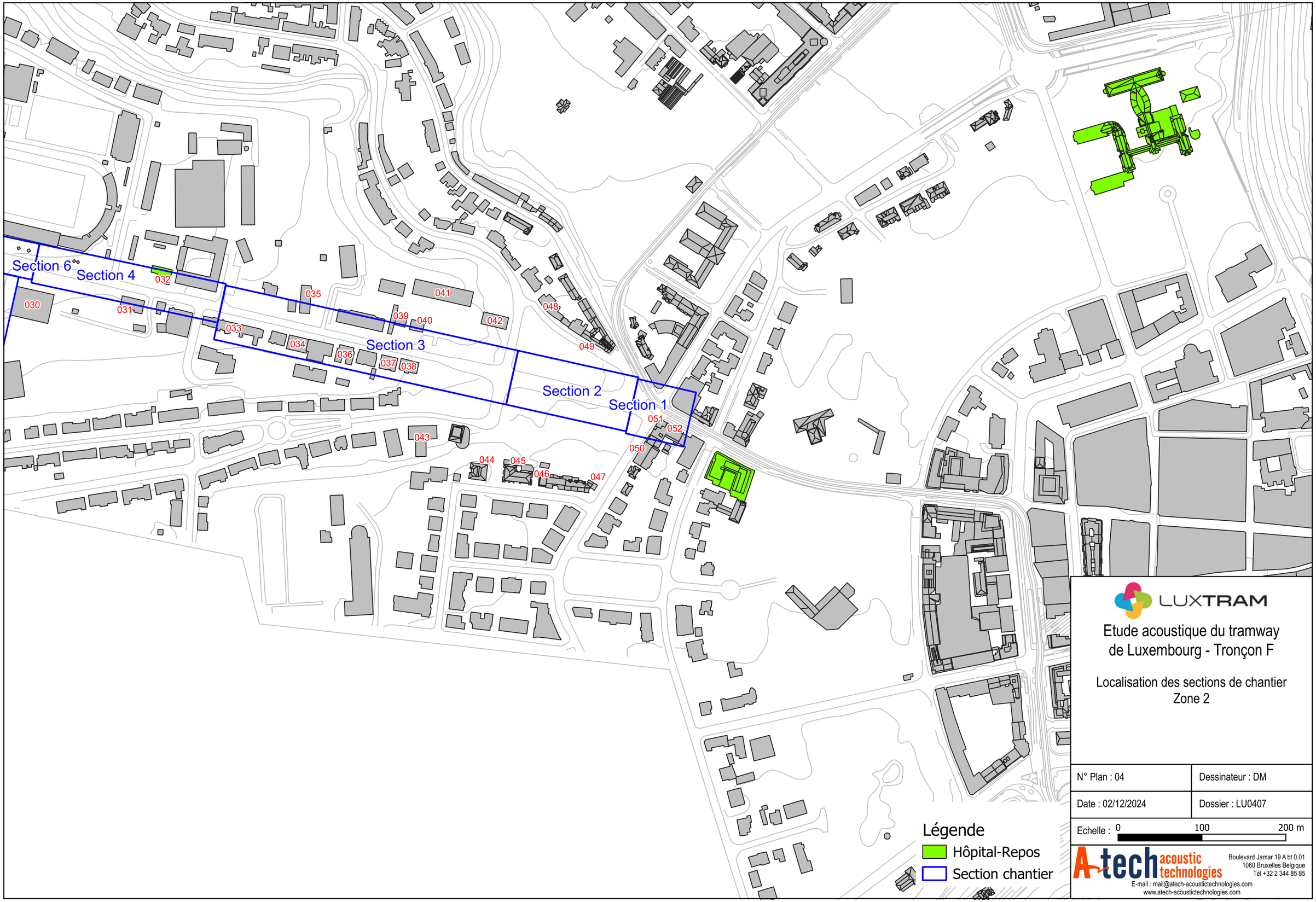
N° Plan : 02	Dessinateur : DM
Date : 02/12/2024	Dossier : LU0407

Echelle : 0 100 200 m

A-tech acoustic technologies
Boulevard Jamar 19 A bt 0.01
1060 Bruxelles Belgique
Tél +32 2 344 85 85
E-mail : mail@atech-acoustictechnologies.com
www.atech-acoustictechnologies.com

4.2 Localisation des sections de chantier


Section 15
Section 14
Section 13
Section 12
Section 11
Section 10
Section 9
Section 8
Section 7
Section 6
Section 5
Section 4
Section 3
001
002
003
004
005
006
007
008
009
010
011
012
013
014
015
016
017
018
019
020
021
022
023
024
025
026
027
028
029
030
031
032
033
035
Légende
Hôpital-Repos
Section chantier
LUXTRAM
Etude acoustique du tramway
de Luxembourg - Tronçon F
Localisation des sections de chantier
Zone 1
N° Plan : 03
Dessinateur : DM
Date : 02/12/2024
Dossier : LU0407
Echelle : 0 100 200 m
A-tech acoustic technologies
Boulevard Jamar 19 A bt 0.01
1060 Bruxelles Belgique
Tél +32 2 344 85 85
E-mail : mail@atech-acousticetechnologies.com
www.atech-acousticetechnologies.com



LUXTRAM

Etude acoustique du tramway de Luxembourg - Tronçon F

Localisation des sections de chantier
Zone 2

N° Plan : 04	Dessinateur : DM
Date : 02/12/2024	Dossier : LU0407

Echelle : 0 100 200 m

A-tech acoustic technologies
Boulevard Jamar 19 A bt 0.01
1060 Bruxelles Belgique
Tél +32 2 344 85 85
E-mail : mail@atech-acoustictechnologies.com
www.atech-acoustictechnologies.com

4.3 Déroulement des travaux

Marché relatif au tronçon « Route d'Arlon »

Nouveau tronçon tramway sur la Route d'Arlon

SCHROEDER & ASSOCIÉS

Descriptif des phases de chantier :

- Secteurs avec une insertion du tramway en surface
- Secteurs avec une insertion du tramway en tranchée couverte de la station Stade vers le CHL

➢	**Luxtram Tronçon Route d'Arlon**
	CaFe
	21/1194
	22.11.2024

Indice	Date	Modification
A	22.11.2024	Version initiale

Table des matières

1. Description générale 4

> 1.1. Insertion du tramway en surface : Place de l'Etoile jusqu'à la station Wunnquartier Stade et de la sortie de la tranchée couverte au sud du CHL jusqu'au Pôle d'Echange CHL 4

> 1.2. Insertion du tramway en tranchée couverte : De la station Wunnquartier Stade jusqu'à la trémie au Sud du CHL 8

2. Planning des travaux 10

> 2.1. Insertion en tranché couverte : tronçon entier de 800 m 10

> 2.1.1. Phase 1 : Terrassement et déviation des réseaux au niveau des parois berlinoises 10

> 2.2. Insertion en tranché couverte : tronçons de 100 m (150m au niveau des trémies) 10

> 2.2.1. Phase 1 : Réalisation des pieux forés 10

> 2.2.2. Phase 2 : Réalisation des parois berlinoises 10

> 2.2.3. Phase 3 : Terrassement pour la dalle 11

> 2.2.4. Phase 4 : Réalisation de la dalle supérieure (armatures, bétonnage, complexe étanchéité) 11

> 2.2.5. Phase 5 : Remblais de la voirie 11

> 2.2.6. Phase 6 : Terrassement en taupe, dalle inférieure et infrastructure 11

> 2.3. Insertion tramway en surface : Section 1 Raccordement à la ligne existante (70 m) 12

> 2.4. Insertion tramway en surface : Section 2 Place de l'Etoile (150 m) 12

> 2.5. Insertion tramway en surface : Section 3 (350 m) 12

> 2.6. Insertion tramway en surface : Section 4 (220 m) 13

> 2.7. Insertion tramway en surface : Section 5 (270 m) 13

> 2.8. Insertion tramway en surface : Sections 13 et 14 (420m) 14

> 2.9. Insertion tramway en surface : Section 15 (200m) 15

1. DESCRIPTION GÉNÉRALE

Luxtram souhaite développer un nouveau tronçon de tramway principalement sur la route d'Arlon dans le cadre du Plan National de Mobilité 2035. Plus précisément ce nouveau tronçon de Tramway dénommé « Route d'Arlon » se raccorde à la ligne existante au niveau de la Place de l'Etoile et continue sur la route d'Arlon puis sur la rue Federspiel le long de l'hôpital CHL pour finir dans le futur Pôle d'Echange CHL (2km et 4 stations).

Le secteur de 2km a été découpé en plusieurs sections de différentes longueurs : des tronçons entre carrefours pour les parties avec une insertion du tramway en surface et les parties avec une insertion du tramway en tranchées couverte ont été considérés par 100m pour mieux apprivoiser la gestion des déviations réseaux et accès riverains. Le découpage se trouve en annexe.

Pour la partie exécution, la majorité des travaux se font en journée de 8h00 à 17h00 et en semaine de 5 jours sur 7. Le samedi n'est pas considéré comme travaillé dans le planning mais il peut être travaillé par l'entreprise afin de respecter les délais du planning. Cette remarque vaut également pour les horaires de travail, la plage horaire possible va de 7h00 à 19h00. Ces travaux ne s'effectuent pas durant les congés collectifs ou les jours fériés soit un total de 6 semaines par an non travaillé.
Les travaux critiques tels que le raccordement à la ligne existante à l'Est de la Place de l'Etoile sont considérés travaillés durant les congés collectifs. Certains phasages particuliers pourront s'effectuer durant les congés collectifs, en particulier les carrefours afin de créer le moins d'impact sur le trafic. Les travaux planifiés durant les congés collectifs feront l'objet d'une demande à l'ITM.

On retrouve les phases suivantes :

1.1. Insertion du tramway en surface : Place de l'Etoile jusqu'à la station Wunnquartier Stade et de la sortie de la tranchée couverte au sud du CHL jusqu'au Pôle d'Echange CHL

Phase 1 :

- Barrage de la partie Nord sur toute la section.
- 2 voies de la route existante ainsi que le trottoir restent en service.
- L'accès pour les habitants du côté Nord (le long de la zone des travaux) sera garanti par des chemins d'accès provisoires qui évolueront suivant l'avancement du chantier. Un phasage plus fin des accès sera réalisé en APD.
- Les travaux dans la zone travaux pendant la phase 1 sont :
  - Travaux de déviation des réseaux
  - Travaux de pose de nouveaux réseaux
  - Travaux de raccords particuliers (réseaux)
  - Travaux d'aménagement d'une voirie provisoire et d'un trottoir provisoire (déviation de la route d'Arlon du côté nord en phase 2)

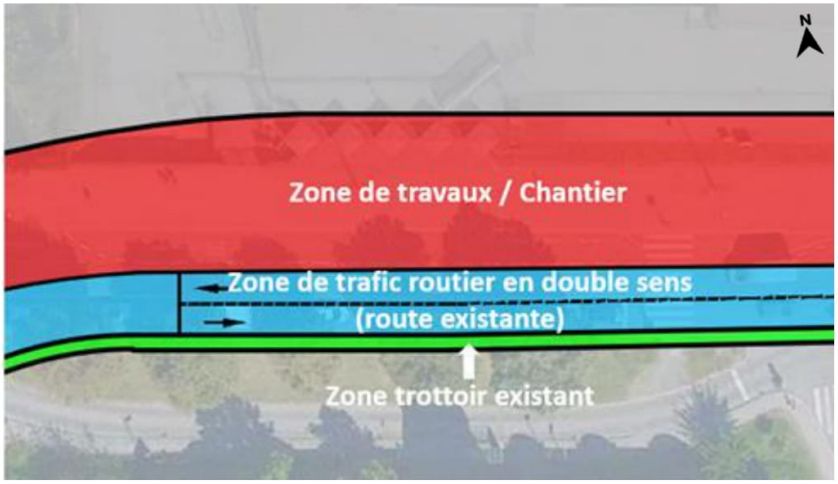


Figure 1 : Schéma de phasage insertion en surface du tram : phase 1

Phase 2 :

- Barrage de la partie sud de la route sur toute la section.
- 2 voies de la route provisoire réalisée à la fin de la phase 1 seront mises en service avec 1 trottoir.
- L'accès pour les habitants du côté Sud (le long de la zone des travaux) sera garanti par des chemins d'accès provisoires qui évolueront suivant l'avancement du chantier. Un phasage plus fin des accès sera réalisé en APD.
- Les travaux dans la zone travaux sont :
  - Travaux de déviation des réseaux
  - Travaux de pose de nouveaux réseaux
  - Travaux de raccords particuliers (réseaux)
  - Travaux d'aménagement du trottoir côté sud, de la piste cyclable avec les adaptations définitives et des 2 voies routiers provisoires en sens unique
- **Après cette phase, les travaux de trottoir et de piste cyclable côté sud sont achevés.**

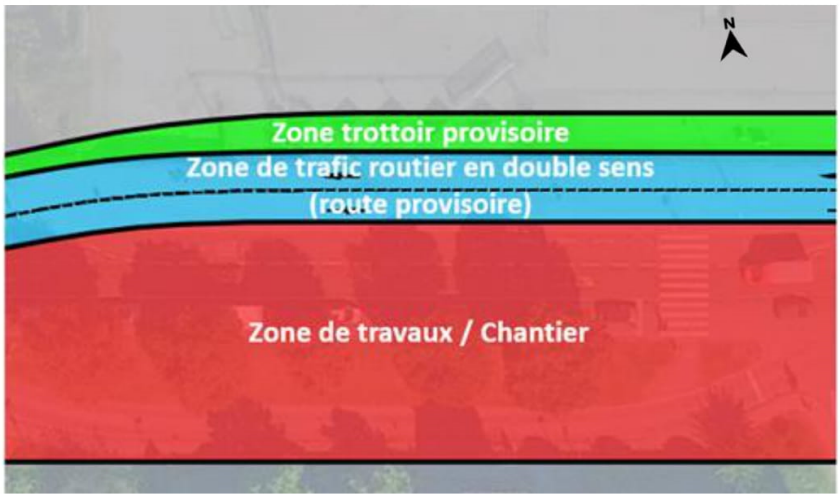


Figure 2 : Schéma de phasage insertion en surface du tram : phase 2

Phase 3 :

- Les travaux dans la zone travaux sont :
  - Travaux du trottoir définitif côté Nord
  - Travaux plateforme
  - Travaux de pose de voies (une piste de chantier n'est pas disponible dans toutes les zones, la présence de piste de chantier est précisée dans chaque section. Dans les autres zones, la pose de voies se fait en tunnel.)
  - Travaux de voirie définitive
  - Travaux de la LAC
  - Mise en service du réseaux Tram et des essais de circulation

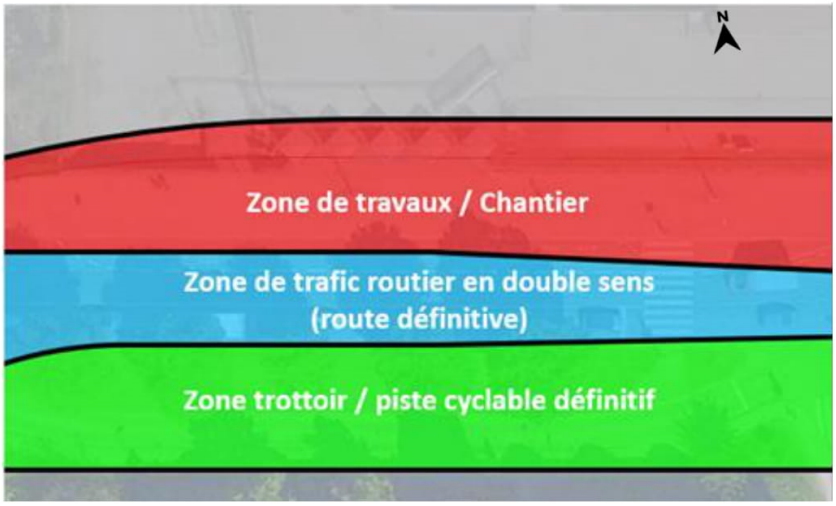


Figure 3 : Schéma de phasage insertion en surface du tram : phase 3

Cette première zone a une longueur d'environ 700m de long et se découpe en 7 phases. Chacune des phases est de 100 m de long évitant ainsi une trop importante longueur de réseau en surface.

Travaux à réaliser :

- Réalisation de parois berlinoises
- Terrassement avec la déviation de l'ensemble des réseaux présents
- Réalisation de parois avec des pieux
- Réalisation de la dalle supérieure
- Remblais
- Terrassement en dessous de la dalle supérieure
- Réalisation de la dalle inférieure

1.2. Insertion du tramway en tranchée couverte : De la station Wunnquartier Stade jusqu'à la trémie au Sud du CHL

La tranchée couverte de la route d'Arlon est découpée en tronçons d'environ 100m et 150m au niveau des trémies (entrées/sorties) de la tranchée couverte. Des tronçons de 100m ont été défini en phase chantier de génie civil pour limiter les impacts sur les réseaux. Une ouverture de 100m permet de mieux apprivoiser les problématiques d'accès aux habitations pour les riverains ou les services d'urgences. Les accès au cas par cas seront étudiés en APD.

Figure 4 : Schéma des sections en insertion en tunnel du tram

Phase 1 :

- Découpage de la route en une première moitié puis 2ème moitié en garantissant trottoirs et 1 voie de circulation dans chaque sens.
- L'accès pour les habitants du côté Nord (le long de la zone des travaux) sera garanti par des chemins d'accès provisoires qui évolueront suivant l'avancement du chantier. Un phasage plus fin des accès sera réalisé en APD.
- Les travaux dans la zone travaux sont :
  - Décapage de l'enrobé
  - Mise en place de réseaux définitifs en profondeur
  - Mise en place des réseaux provisoires
  - Mise en service des réseaux définitifs ou provisoires en coordination avec les différents concessionnaires
  - Réalisation d'une voirie provisoire

Phase 2 :

- Réalisation en partant des extrémités en 2 fronts en simultanée
- Lors des phases 2 et 3 l'encombrement des moyens de réalisation des travaux ne permet pas de garantir 1 voie de circulation dans chaque sens. Des déviations d'itinéraires seront proposées au service Circulation de la Ville de Luxembourg ainsi que les Ponts et Chaussées pour discussion.
- Les travaux dans la zone travaux sont :
    - Réalisation des pieux forés et du blindage en parois berlinoise à l'aide de 4 machines de forage considérés ici dans le planning

Phase 3 :

- Réalisation en partant des extrémités en 2 fronts en simultanée à la suite des pieux et blindage.
- Lors des phases 2 et 3 l'encombrement des moyens de réalisation des travaux ne permet pas de garantir 1 voie de circulation dans chaque sens. Des déviations d'itinéraires seront proposées au service Circulation de la Ville de Luxembourg ainsi que les Ponts et Chaussées pour discussion.
- L'accès pour les habitants du côté Nord (le long de la zone des travaux) sera garanti par des chemins d'accès provisoires qui évolueront suivant l'avancement du chantier. Un phasage plus fin des accès sera réalisé en APD.
- Les travaux dans la zone travaux sont :
    - Terrassement jusqu'au niveau dessous de dalle supérieure
    - Recépage des pieux
    - Réalisation de la dalle supérieure : ferraillage, bétonnage, étanchéité
    - Remblais comprenant la pose des réseaux définitifs

Phase 4 : Réalisation en partant des extrémités en 2 fronts en simultanée

- Les travaux dans la zone travaux sont :
    - Terrassement en taupe dès la réalisation de la dalle supérieure

Phase 5 : En une seule fois

- Les travaux dans la zone travaux sont :
    - Réalisation de la voirie définitive : réalisation de l'asphalte

Phase 6 : Travaux dans la tranchée couverte

- Les travaux dans la zone travaux sont :
    - Réalisation de la dalle amortie, multis Tram et CREOS
    - Pose de la voie ferrée
    - Pose des équipements de sécurité tunnel
    - Pose des ancrages PAC
    - Travaux des différents systèmes tram
    - Déroulage de la PAC et mise en tension
    - Mise en service du réseaux Tram et des essais de circulation

2. PLANNING DES TRAVAUX

Le planning de déroulement des travaux pour la réalisation de la tranchée couverte et des travaux en surface ainsi que l'envergure des engins de chantier sont estimés en énumérant le nombre et le type d'engins travaillant simultanément sur le chantier. Les types d'engins sont renseignés à titre indicatif ou équivalent.

2.1. Insertion en tranché couverte : tronçon entier de 800 m

2.1.1. Phase 1 : Terrassement et déviation des réseaux au niveau des parois berlinoises

Durée estimée : 11 mois

- ➔ 4 mini - pelles de type Yanmar vio 26-6, à LWAG : 93 dB (A) et LPAG : 81 dB (A)
- ➔ Camions : 1 camion/jour

2.2. Insertion en tranché couverte : tronçons de 100 m (150m au niveau des trémies)

2.2.1. Phase 1 : Réalisation des pieux forés

- Environ 110 pieux pour chaque tronçon de 100 m → profondeur de chaque pieu d'environ 19 m
  Rendement d'un engin de forage est de 40 m/pieu par jour.
  Il y aura deux engins qui ont la capacité de réaliser 80 m de pieu par jour.
  Durée estimée : 10 semaines par tronçon de 100m (et 15 semaines pour tronçon de 150m)
  - ➔ 2 foreuses type Bauer BG-20 à 111,2 dB (A)
  - ➔ 1 chargeuse sur pneu type Liebherr L 514 à 109 dB (A)

2.2.2. Phase 2 : Réalisation des parois berlinoises

- Environ 100 pieux pour chaque tronçon de 100 m → profondeur de chaque pieu d'environ 9 m
  Rendement d'un engin de forage est de 40 m/pieu par jour.
  Durée estimée : 22 jours pour 100 m (34 jours pour 150m)
  - ➔ 1 foreuse type Bauer BG-20 à 111,2 dB (A)
  - ➔ 1 chargeuse sur pneu type Liebherr L 514 à 109 dB (A)

2.2.3. Phase 3 : Terrassement pour la dalle

- Environ 3 600 m3 de terrassement en dessous de la dalle supérieure

  Durée estimée : 3 semaines par tronçon de 100m (4 semaines pour 150m)
  - ➔ 2 pelles hydrauliques de type Liebherr 934 C, à 106 dB(A)
  - ➔ Camions : 10 camions/jour

2.2.4. Phase 4 : Réalisation de la dalle supérieure (armatures, bétonnage, complexe étanchéité)

- Environ 1 100 m3 de béton armé (1650 m3 pour 150m)

  Durée estimée : 10 semaines par tronçon de 100m (15 semaines pour 150m)
  - ➔ 158 camions toupies + pompe à béton (237 camions toupies pour 150m)

2.2.5. Phase 5 : Remblais de la voirie

- Environ 2 500 m3 de remblais

  Durée estimée : 10 semaines par tronçon de 100m (12 semaines pour 150m)
  - ➔ 2 pelles hydrauliques de type Liebherr 934 C, à 106 dB (A)
  - ➔ Camions : 10 camions/jour

2.2.6. Phase 6 : Terrassement en taupe, dalle inférieure et infrastructure

- Environ 5 500 m3 de terrassement en dessous de la dalle supérieure

  Durée estimée : 3 semaines par tronçon de 100m (23 jours pour 150m)
  - ➔ 2 pelles hydrauliques de type Liebherr 934 C, à 106 dB(A)
- Environ 1 200 m3 de béton armé

  Durée estimée : 3 semaines par tronçon de 100m (4 semaines pour 150m)
  - ➔ 170 camions toupies + pompe à béton (240 pour 150m)

2.3. Insertion tramway en surface : Section 1 Raccordement à la ligne existante (70 m)

Décapage de l'asphalte et terrassement avec la déviation de l'ensemble des réseaux présents

- Environ 3 600 m3 de terrassement (surface 1 500 m2 avec 2,3m de profondeur)

  Durée estimée : 4 semaines
  - ➔ 2 pelles hydrauliques de type Liebherr 934 C, à 106 dB (A)
  - ➔ Camions : 25 camions/jour

Travaux d'infrastructures (réseaux, pose de voies) - remblai

- Environ 3 600 m3 de remblai

  Durée estimée : 4 semaines
  - ➔ 2 pelles hydrauliques de type Liebherr 934 C, à 106 dB (A)
  - ➔ Camions : 25 camions/jour
  - ➔ Rouleau compacteur tous les jours

2.4. Insertion tramway en surface : Section 2 Place de l'Etoile (150 m)

Travaux d'infrastructures (multis, plateforme, pose de voies)

Durée estimée : 3 mois
- ➔ 1 pelle hydraulique de type Liebherr 934 C, à 106 dB (A)
- ➔ Camions : 2 camions/jour

2.5. Insertion tramway en surface : Section 3 (350 m)

Décapage de l'asphalte et terrassement avec la déviation de l'ensemble des réseaux présents

- Environ 15 400 m3 de terrassement (surface 7 700 m2 avec 2m de profondeur)

  Durée estimée : 16 semaines
  - ➔ 2 pelles hydrauliques de type Liebherr 934 C, à 106 dB (A)
  - ➔ Camions : 25 camions/jour

Travaux d'infrastructures (réseaux, pose de voies) - remblai

- Environ 15 400 m3 de remblai

  Durée estimée : 16 semaines
  - ➔ 2 pelles hydrauliques de type Liebherr 934 C, à 106 dB (A)
  - ➔ Camions : 25 camions/jour
  - ➔ Rouleau compacteur tous les jours

2.6. Insertion tramway en surface : Section 4 (220 m)

Décapage de l'asphalte et terrassement avec la déviation de l'ensemble des réseaux présents

- Environ 9 700 m3 de terrassement (surface 4 850 m2 avec 2m de profondeur)

  Durée estimée : 12 semaines
  - ➔ 2 pelles hydrauliques de type Liebherr 934 C, à 106 dB (A)
  - ➔ Camions : 25 camions/jour

Travaux d'infrastructures (réseaux, pose de voies) - remblai

- Environ 9 700 m3 de remblai

  Durée estimée : 12 semaines
  - ➔ 2 pelles hydrauliques de type Liebherr 934 C, à 106 dB (A)
  - ➔ Camions : 25 camions/jour
  - ➔ Rouleau compacteur tous les jours

2.7. Insertion tramway en surface : Section 5 (270 m)

Phase 1 : Nouvelle rue d'Ostende

Décapage de l'asphalte et terrassement avec la déviation de l'ensemble des réseaux présents

- Environ 2 400 m3 de terrassement (surface 1 600 m2 avec 1,5m de profondeur)

  Durée estimée : 3 semaines
  - ➔ 2 pelles hydrauliques de type Liebherr 934 C, à 106 dB (A)
  - ➔ Camions : 30 camions/jour

Travaux d'infrastructures (réseaux, remblai et aménagements)

- Environ 2 400 m3 de remblai

Durée estimée : 3 semaines

- ➔ 2 pelles hydrauliques de type Liebherr 934 C, à 106 dB (A)
- ➔ Camions : 30 camions/jour
- ➔ Rouleau compacteur tous les jours

Phase 2 : Ancienne rue d'Ostende

Décapage de l'asphalte et terrassement avec la déviation de l'ensemble des réseaux présents

- Environ 2 400 m3 de terrassement (surface 1 600 m2 avec 1,5m de profondeur)

  Durée estimée : 4 semaines
  - ➔ 2 pelles hydrauliques de type Liebherr 934 C, à 106 dB (A)
  - ➔ Camions : 30 camions/jour

Travaux d'infrastructures (réseaux, remblai et aménagements)

- Environ 2 400 m3 de remblai

  Durée estimée : 4 semaines
  - ➔ 2 pelles hydrauliques de type Liebherr 934 C, à 106 dB (A)
  - ➔ Camions : 30 camions/jour
  - ➔ Rouleau compacteur tous les jours

2.8. Insertion tramway en surface : Sections 13 et 14 (420m)

Décapage de l'asphalte et terrassement avec la déviation de l'ensemble des réseaux présents

- Environ 21 200 m3 de terrassement (surface 9 240 m2 avec 2,3m de profondeur)

  Durée estimée : 18 semaines
  - ➔ 2 pelles hydrauliques de type Liebherr 934 C, à 106 dB (A)
  - ➔ Camions : 30 camions/jour

Travaux d'infrastructures (réseaux, pose de voies) - remblai

- Environ 21 200 m3 de remblai

  Durée estimée : 16 semaines
  - ➔ 2 pelles hydrauliques de type Liebherr 934 C, à 106 dB (A)
  - ➔ Camions : 30 camions/jour
  - ➔ Rouleau compacteur tous les jours

2.9. Insertion tramway en surface : Section 15 (200m)

Travaux d'infrastructures (multis, plateforme, pose de voies)

Durée estimée : 12 semaines

- ➔ 1 pelle hydraulique de type Liebherr 934 C, à 106 dB (A)
- ➔ Camions : 2 camions/jour

SCHROEDER & ASSOCIÉS

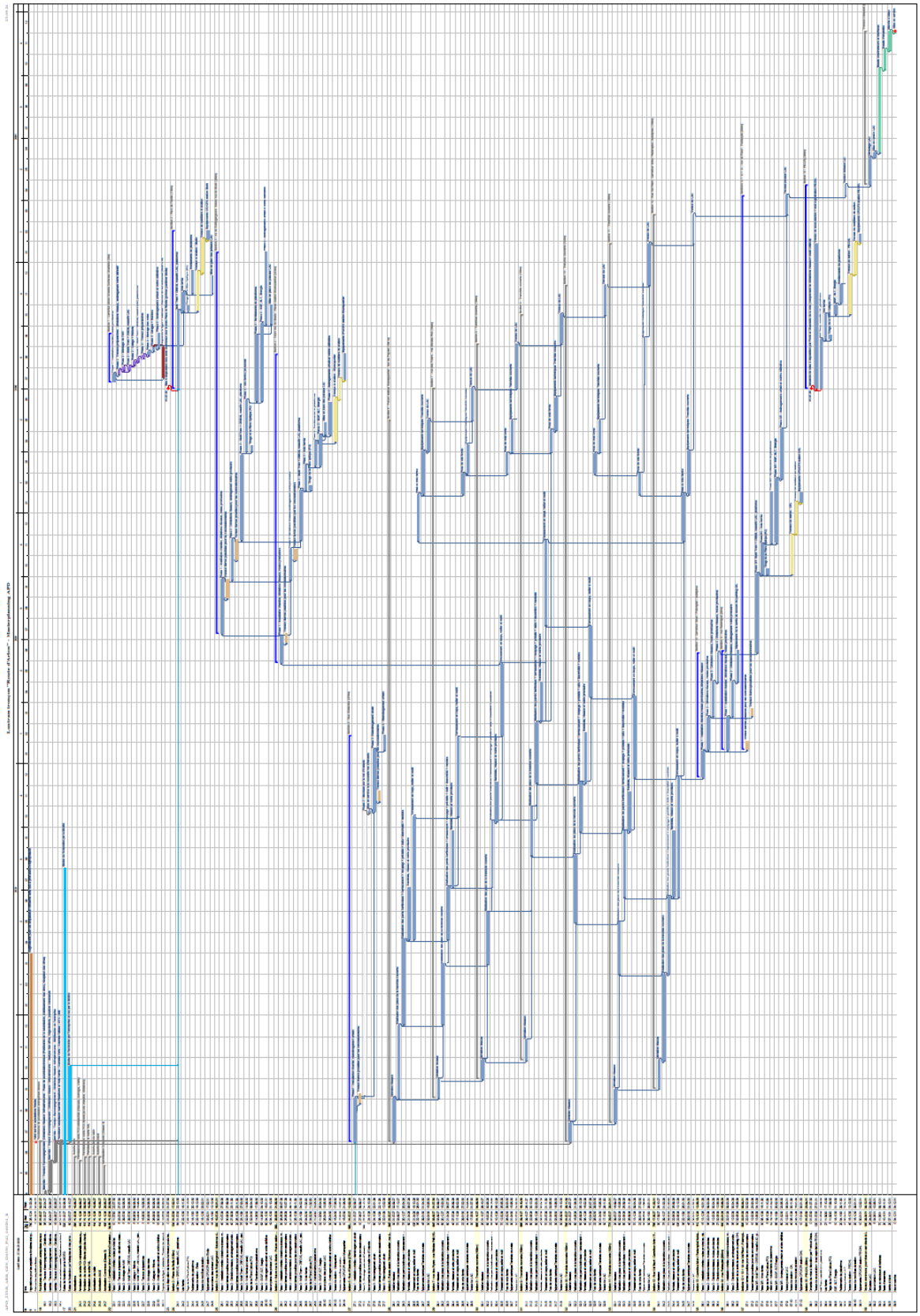
SCHROEDER & ASSOCIÉS
ENGINEERING THE FUTURE TOGETHER

Ingénieurs-Conseils
13, rue de l'Innovation
L-1896 Kockelscheuer

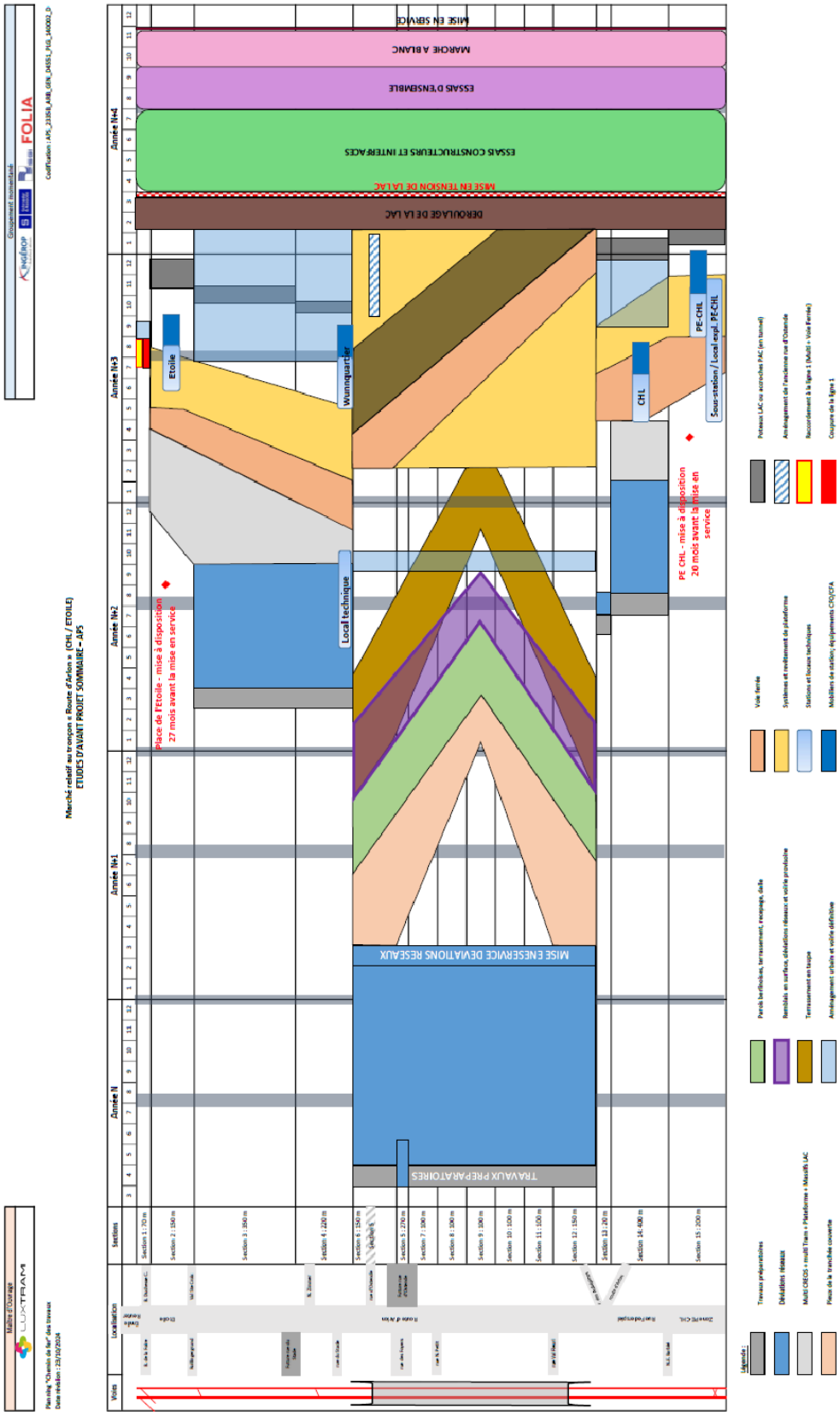
T +352 44 31 31-1
contact@schroeder.lu
www.schroeder.lu

MADE IN LUXEMBOURG
ISO 9001
ISO 45001

4.4 Planning Provisoire des Travaux



4.5 Planning Chemin de Fer



4.6 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 (sollicitation des engins de chantier considérée comme ponctuelle au regard des distances source-bâtiment).

Les caractéristiques du sol sont extraites du rapport géotechnique[14]. 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.

Rue Federspiel

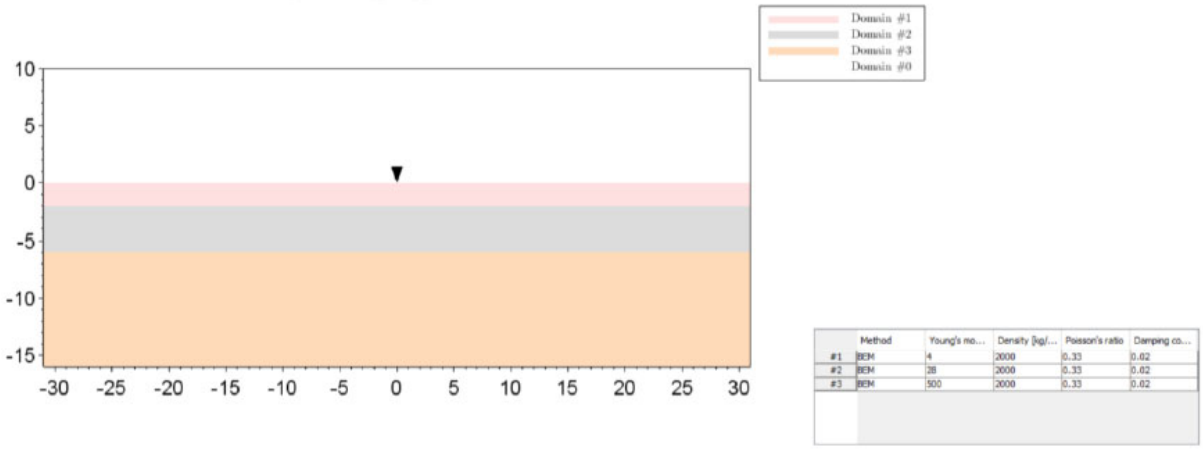


Figure 30 : Coupe 2D de la modélisation Mefissto, rue Federspiel

Le niveau RMS est calculé à différentes distance de la source. Une courbe de tendance de modèle $y = C * x^a$ est alors ajustée afin d'identifier l'exposant a.

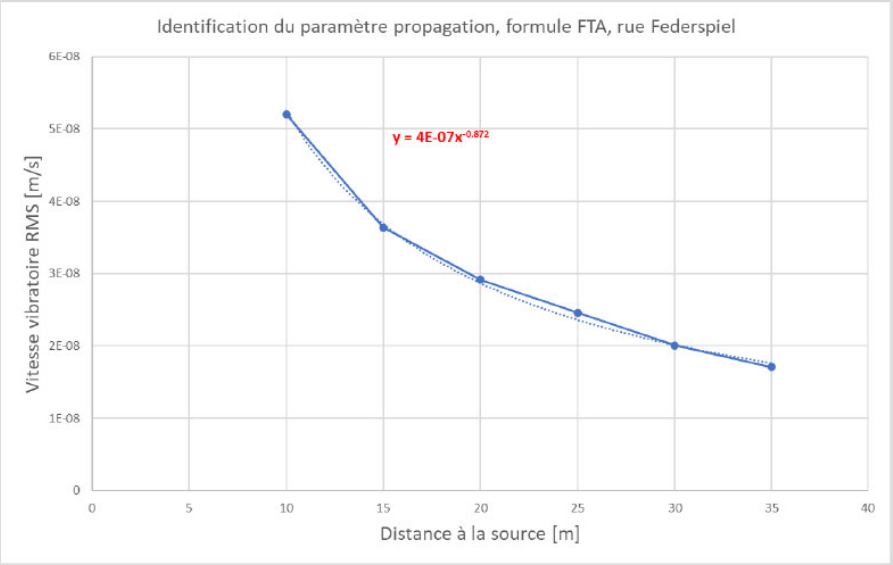


Figure 31 : Ajustement du modèle de propagation type « FTA », rue Federspiel

Pour le modèle « rue Federspiel», l'ajustement du modèle donne un exposant de 0.9. Ce paramètre est donc utilisé dans la formule FTA pour l'estimation des niveaux vibratoires dans cette zone.

[14] Fondasol, «Mission G2 AVP, PR.LUGT.21.210– 001 – indice 0,» 2021.

Route d'Arlon

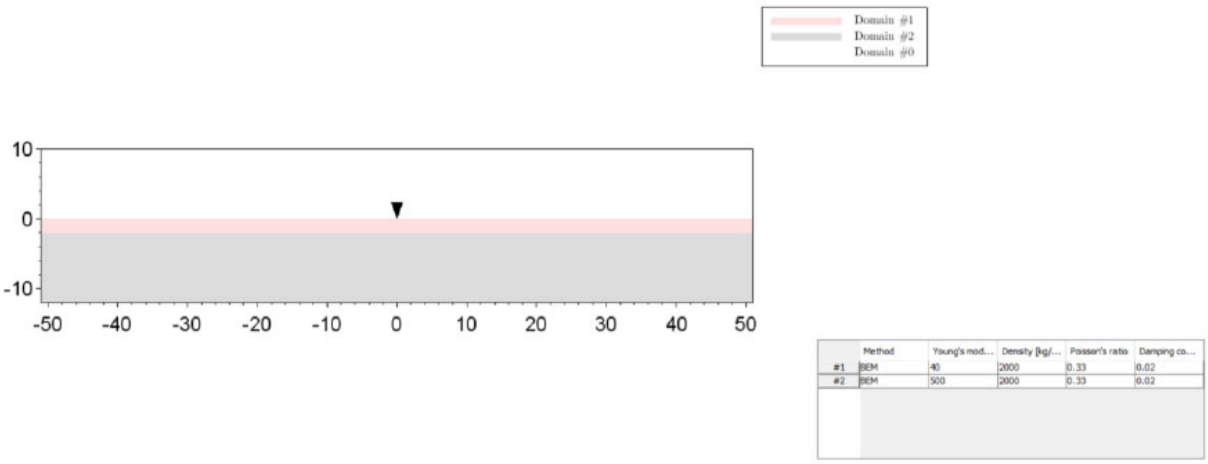


Figure 32 : Coupe 2D de la modélisation Mefissto, route d'Arlon

Le niveau RMS est calculé à différentes distance de la source. Une courbe de tendance de modèle $y = C * x^a$ est alors ajustée afin d'identifier l'exposant a, caractéristique de la zone.

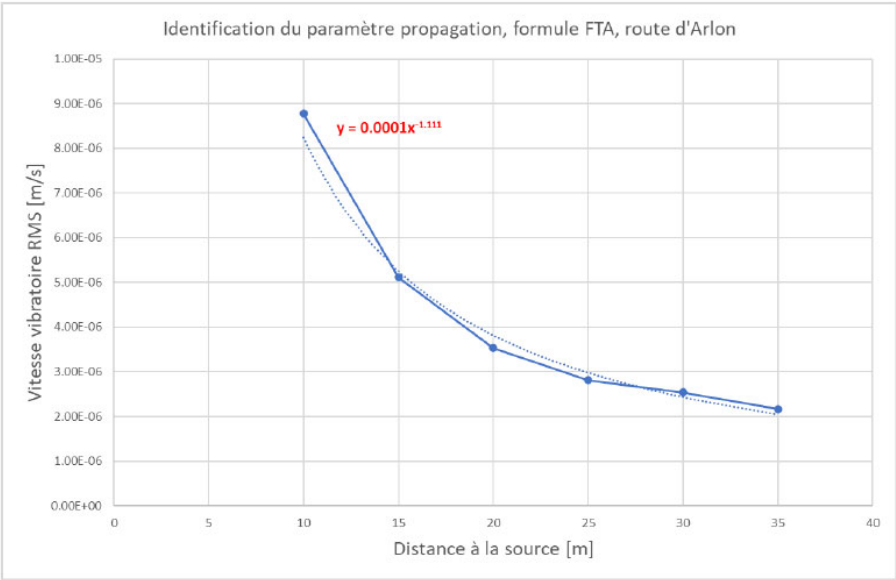


Figure 33 : Ajustement du modèle de propagation type « FTA », route d'Arlon

Pour le modèle « route d'Arlon», l'ajustement du modèle donne un exposant de 1.1. Ce paramètre est donc utilisé dans la formule FTA pour l'estimation des niveaux vibratoires dans cette zone.

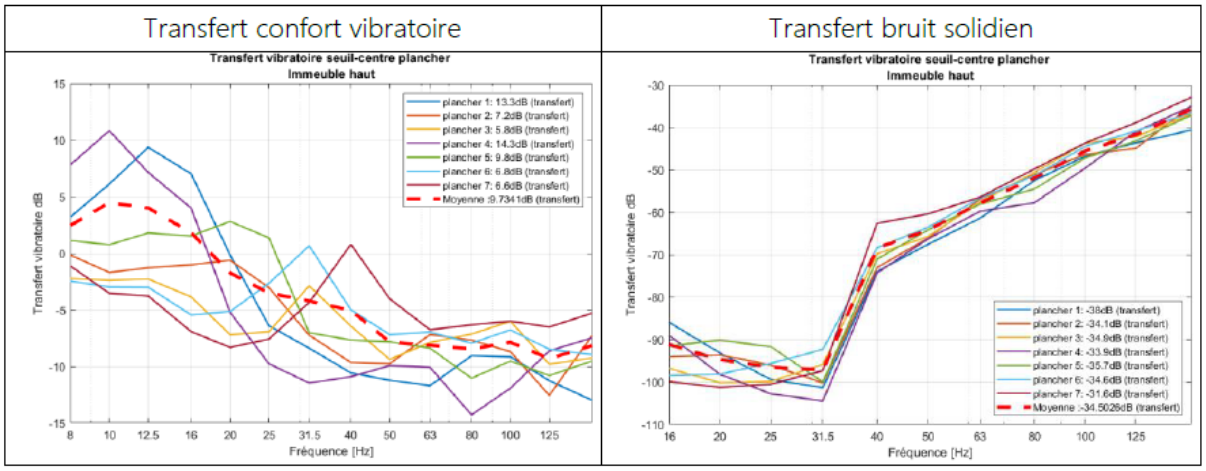
4.7 Terme immission : établissement d'un transfert bâtiment moyen

Afin d'établir un transfert bâtiment « type » pour les différentes catégories de bâtiment, transfert à appliquer sur le niveau calculé en seuil bâtiment à l'aide de la formule FTA, la base de données RIVAS est utilisé. La moyenne quadratique des différents transferts calculés, correspondant aux différents planchers, est ensuite utilisée.

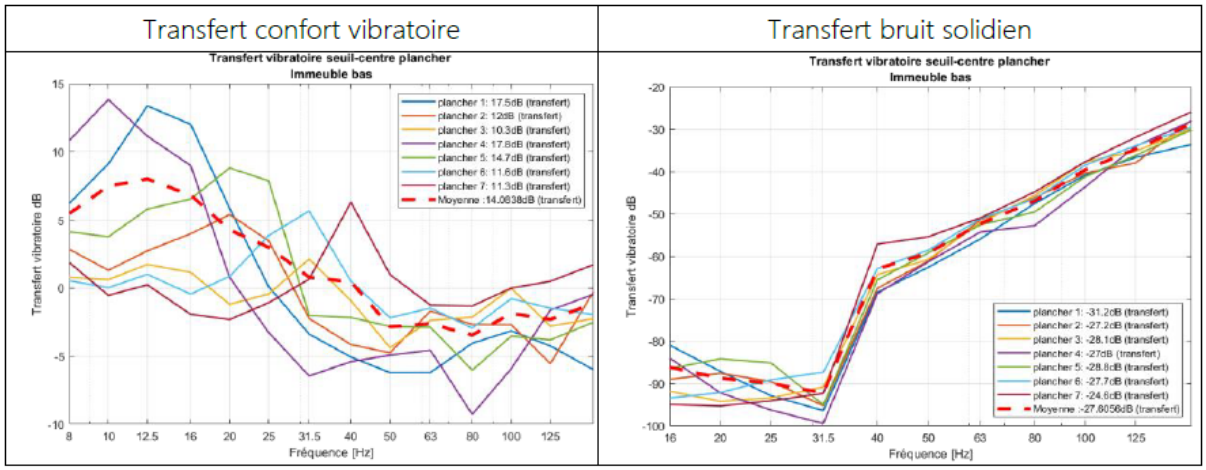
Ce principe est appliqué pour obtenir :

- Un transfert pour le confort vibratoire,
- Un transfert pour le bruit solidien, incluant le filtre de pondération A.

Immeuble haut :



Immeuble bas :



Les valeurs suivantes sont retenues (moyenne quadratique des transferts) :

Tableau 28 : Transfert vibratoire moyen des bâtiments (TF2 + TF3 + émission bruit solidien la cas échéant), confort vibratoire et bruit solidien

	Confort vibratoire	Bruit solidien
Immeuble haut	10	-35
Immeuble bas	14	-27

4.8 Lexique

Le niveau de bruit instantané – le niveau de *pression acoustique* (SPL, Sound Pressure Level) :

Tout ébranlement de l'air donne lieu à des oscillations de la pression autour de la pression atmosphérique, oscillations qui se propagent sous la forme d'ondes. Le son correspond à un domaine restreint de ces variations de pression, dont les fréquences sont sensibles à l'oreille, et dont l'amplitude s'appelle la *pression acoustique.* Cette amplitude est exprimée sous forme de niveau de pression acoustique par la formule :

$$SPL(t) = 10 \times \log(p^2(t) / p_0^{\ 2})$$

Où :

p(t) est la variation de pression en fonction du temps.
p_0 est la pression de référence, soit 2×10^{-5} Pascal.

Le décibel (dB) :

Le décibel (dB) est l'unité de mesure de la *pression acoustique*. L'échelle utilise comme référence une pression sonore de 2×10^{-5} Pascal : cette valeur correspond au seuil moyen d'audibilité.

Ainsi, un niveau de 0 dB correspond au seuil d'audibilité de l'être humain, alors qu'un niveau de pression de 120 dB correspond au seuil de douleur, pour lequel il y a risque de lésion rapide et irréversible de l'ouïe.

Pour fixer les idées, le tableau suivant donne, pour une échelle comprise entre 0 dB(A) et 120 dB(A), les principaux effets du bruit, ainsi que des situations-types pour lesquelles ces niveaux peuvent être rencontrés.

Principaux effets	*SPL*	*Lieux typiques*
Seuil de douleur.	**120 dB(A)**	Avion à réaction sur la piste de décollage.
Risque de lésion rapide et irréversible de l'oreille.	**110 dB(A)**	Orchestre de musique Pop.
Grave danger de dommage auditif pour une exposition habituelle de 8h par jour.	**100 dB(A)**	Marteau piqueur à 1 mètres. Moto sans silencieux en pleine accélération à 7 mètres.
	90 dB(A)	Camion à 7 mètres.
Début du danger de dommage auditif pour une exposition continue de 8H par jour.	**80 dB(A)**	Carrefour animé. Bruit dans une voiture peu insonorisée.
	70 dB(A)	Façade d'immeuble au bord d'une autoroute. Bruit de conversation animée.
	60 dB(A)	Fenêtres ouvertes à l'intérieur d'une pièce donnant sur une rue animée.
	50 dB(A)	Fenêtre fermée sur rue animée.
Début d'interférence avec le sommeil.	**40 dB(A)**	Salle de séjour calme.
	30 dB(A)	Chambre à coucher silencieuse. Bruissement de feuilles.
	20 dB(A)	Studio de radio, désert.
A peine audible, silence insupportable.	**10 dB(A)**	Chambres sourdes.
Seuil d'audibilité.	**0 dB(A)**	

Table 1: échelle de bruit

L'échelle de pondération « A » (dB(A)) :
Les appareils de mesure utilisés pour relever les niveaux sonores enregistrent les variations de la pression atmosphérique en un endroit particulier.

Or, l'oreille humaine, sujette aux mêmes variations de pression, en interprète le caractère fréquentiel (le spectre fréquentiel : fréquences aiguës, fréquences basses, fréquences intermédiaires) pour fournir la sensation auditive.

La courbe de pondération fréquentielle « A » est utilisée sur les sonomètres afin de refléter de façon chiffrée notre perception auditive particulière des sons et leurs caractéristiques fréquentielles.

Le décibel « A » (dB(A)) regroupe, en une seule valeur, l'ensemble de toutes les fréquences, qu'il pondère suivant la façon dont notre oreille les perçoit.

Le niveau équivalent « $L_{Aeq}(t)$ » :
La plupart des sources de bruit, et particulièrement celles liées aux moyens de transport, sont fluctuantes.

Un bruit fluctuant ne peut pas être décrit de façon aussi simple qu'un bruit continu. On peut le décrire d'une manière statistique, mais en général, on le caractérise par un *niveau de bruit équivalent*, soit le niveau global de la pression acoustique pondérée (A) (exprimé en dB(A)) d'un bruit qui serait permanent et qui donnerait la même énergie acoustique que le bruit considéré sur la période de mesure (t) : c'est le niveau acoustique équivalent $L_{Aeq}(t)$. Il est calculé sur une période de temps (t), variable selon les appareils et les objectifs poursuivis.

Le niveau minimal « $L_{Amin}(t)$ » :
C'est le niveau minimal de pression acoustique (exprimé en dB(A)) observé pendant la période (t) considérée. Il caractérise le niveau qui est toujours dépassé au cours de cette période.

Le niveau maximal « $L_{Amax}(t)$ » :
C'est le niveau maximal de pression acoustique (exprimé en dB(A)) observé pendant la période (t). Il caractérise le niveau qui n'est jamais dépassé pendant la période (t) considérée.

Les indices statistiques « $L_{Ai}(t)$ » :
L'indice statistique ou indice fractile Li(t) représente le niveau de pression acoustique (exprimé en dB(A)) dépassé pendant i % de la période (t) considérée.

Ainsi, le $L_{A10}(t)$ représente assez bien les niveaux les plus importants rencontrés et les sources de bruit ponctuelles, alors que le $L_{A90}(t)$ donne une bonne estimation du bruit de fond existant et des sources de bruit stables.

Le niveau jour-soir-nuit (day-evening-night level) « L_{den} » :
Le niveau jour-soir-nuit L_{den} en décibels est défini par la formule suivante :

$$Lden = 10log\frac{1}{24}\left(12 \times 10^{\frac{L_{day}}{10}} + 4 \times 10^{\frac{L_{evening}+5}{10}} + 8 \times 10^{\frac{L_{night}+10}{10}}\right)$$

L_{day} est le niveau sonore moyen à long terme pondéré A tel que défini dans ISO 1996-2 :1987, déterminé sur l'ensemble des périodes de jour (07-19h) d'une année ;

$L_{evening}$ est le niveau sonore moyen à long terme pondéré A tel que défini dans ISO 1996-2 :1987, déterminé sur l'ensemble des périodes de soirée (19-23h) d'une année ;

L_{night} est le niveau sonore moyen à long terme pondéré A tel que défini dans ISO 1996-2 :1987, déterminé sur l'ensemble des périodes de nuit (23-07h) d'une année.