EPFL

RESSLab
Resilient Steel Structures Laboratory

Réévaluation du facteur lambda pour la vérification à la fatigue des ponts ferroviaire à voie étroite

Document de référence pour la mise à jour
des normes SIA 261 et SIA 269/1

Version finale, Avril 2026 (V47)

Auteurs :

Gianluca Bianchi

Alain Nussbaumer



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Impressum

Equipe de projet

Direction de projet

Prof. Alain Nussbaumer, EPFL-ENAC-IIC-RESSLab, Lausanne

Membres

Gianluca Bianchi, EPFL-ENAC-IIC-RESSLab, Lausanne et Näxte GmbH, Schlieren (ZH)

Groupe d'accompagnement

Président

Alessandro Castelli, OFT, division sécurité, Ittigen

Membres

Karl Baumann, Rhätische Bahn AG, section Infrastruktur / Kunstbauten, Coire

Dr. Senta Haldimann, VöV, division transports publics, Berne

Fritz Rüchti, Office Fédéral des Transports (BAV/OFT), Ittigen

Ainsi que les entreprises de transport participantes : MGB, MOB, RhB, ZB, Bern Mobil, TPG, VBZ et BVB.















Déclaration relative à la disponibilité des données : les données envoyées par les entreprises de transport public, ainsi que l'ensemble des résultats et graphiques produits sont disponibles auprès des auteurs du rapport sur demande à : alain.nussbaumer@epfl.ch

Table des matières

Impressum ii
Table des matières 3
Liste des figures 7
Liste des Tableaux 9
Liste des abréviations 10
Notations 10
Liste des logiciels 12
1 Introduction 13
1.1 Contexte 13
1.2 Objectifs et contenu 13
1.3 Structure du rapport 14
2 Concepts de base du dimensionnement à la fatigue 16
2.1 Relevance de la vérification de la fatigue 16
2.2 Résistance des détails 16
2.3 Vérifications de la fatigue 18
2.3.1 Vérification avec la limite de fatigue 19
2.3.2 Vérification avec le cumul de dommage 19
2.3.3 Méthode d'équivalence de dommages 21
2.4 Méthode & valeurs des facteurs lambda (selon SIA 261 : 2020) 22
2.4.1 Facteur partiel pour l'effet du trafic λ_1 23
2.4.2 Facteur partiel pour adapter le volume de trafic λ_2 23
2.4.3 Facteur partiel pour adapter la durée de service de l'ouvrage λ_3 24
2.4.4 Facteur partiel pour adapter à un trafic sur plusieurs voies λ_4 24
2.4.5 Facteur λ_{max} fixant la borne supérieure 25
2.5 Définition de la longueur déterminante L_λ 25
2.6 Modèles de charge de fatigue 26
2.6.1 Introduction 26
2.6.2 Voies étroites, modèles de charge de fatigue 4 et 5 27
3 Proposition de mise à jour de la Norme SIA 261 28
3.1 Introduction 28

3.2 Proposition 28

4 Exemples d'utilisation de la nouvelle méthode lambda 34

4.1 Trafic réel utilisé 34

4.2 Systèmes statiques, longueurs déterminantes $L\lambda$ et facteurs partiels 34

4.3 Résultats des différentes vérifications 37

4.3.1 Vérification avec la limite de fatigue (vie infinie) 37

4.3.2 Vérification avec le cumul de dommages 38

4.3.3 Vérification avec l'équivalence des dommages, méthode actuelle 38

4.3.4 Vérification avec l'équivalence des dommages, méthode révisée 40

4.4 Conclusion 42

5 Développement des algorithmes 46

5.1 Fonctionnement de l'algorithme 46

5.2 Méthode pour obtenir λ_1 47

5.3 L'algorithme du rainflow 48

5.4 Lignes d'influence 49

6 Facteur d'amplification dynamique (DAF) 52

7 Modélisation du trafic réel 56

7.1 Introduction du trafic réel 57

7.1.1 Matterhorn Gotthard Bahn 59

7.1.2 Compagnie du chemin de fer Montreux Oberland Bernois 60

7.1.3 Rhätische Bahn 60

7.1.4 Die Zentralbahn 61

7.2 Trafic selon EN 1991-2 (trafic ferroviaire à voie normale) 62

7.3 Trafic spécifique réel 63

7.4 Définition d'un trafic standardisé 64

7.5 Effets dynamiques 65

8 Génération de l'histogramme des cycles de contraintes 67

8.1 Historique des contraintes et histogramme des cycles 67

8.1.1 1 wagon franchissant une ligne d'influence de 2 m de portée 68

8.1.2 1 train traversant une ligne d'influence de 2 m de portée 69

8.1.3 1 train traversant une ligne d'influence de 10 m de portée 70

8.1.4 10 trains traversant une ligne d'influence de 10 m de portée 71

8.1.5 10 trains traversant une ligne d'influence de 100 m de portée 72

8.1.6 100 trains traversant une ligne d'influence de 10 m de portée 73

8.1.7 100 trains traversant une ligne d'influence de 100 m de portée 74

8.1.8 10'000 trains traversant une ligne d'influence de 10 m de portée 75

8.1.9 10'000 trains traversant une ligne d'influence de 100 m de portée 76
8.1.10 Considérations finales 76
8.2 Analyse de sensibilité sur la géométrie des trains 77
8.2.1 Exemple de variation des géométries 77
8.2.2 Résultats 78
8.2.3 Considérations finales 79
9 Validation des algorithmes 80
9.1 Corrélation entre le facteur partiel λ_1 des voies standard et voies étroites 82
10 Réflexions par rapport aux facteurs partiels λ_2 , λ_3, λ_4 et λ_{max} 85
10.1 Facteur partiel λ_2 pour le volume de trafic 85
10.2 Facteur partiel λ_3 pour la durée de service 86
10.3 Facteur partiel λ_4 pour le trafic sur plusieurs voies 86
10.4 Facteur λ_{max} comme limite supérieure 88
10.5 Considérations finales sur l'application d'autres facteurs partiels λ_i 88
11 Influence de la forme des courbes de résistance 89
11.1 Double pente $\boldsymbol{m}$ = 3|5 89
11.2 Double pente $\boldsymbol{m}$ = 4|6 89
11.3 Double pente $\boldsymbol{m}$ = 5|9 (barres d'armature) 90
11.4 Conclusion sur la pente de la courbe de résistante à la fatigue 90
12 Définition de la nouvelle courbe λ_1 92
12.1 Coefficient dynamique Φ_{fat} et longueur déterminante L_λ 92
12.2 Autres paramètres de l'analyse 92
12.3 Résultats λ_1 brut 92
12.4 Résultats λ_1 interpolé 93
12.5 Résultats λ_1 d'ensemble 95
12.6 Définition de la courbe et fiabilité 96
12.6.1 Approche pour vérifier le niveau de fiabilité 98
12.6.2 Liste des différentes variables et types d'erreur 98
12.6.3 Calage des courbes lambda en utilisant l'annexe D de l'EN 1990 99
12.7 Version finale 102
13 Trafic des tramways et LM4 103
13.1 Trafic réel utilisé 103
13.2 Facteurs de translation 104
13.3 Validation 105

13.4 Version finale 106

14 Conclusions 107

14.1 Points en suspens 107

14.1.1 Trafic des tramways 108

14.1.2 Trafic ferroviaire à voie standard 108

14.1.3 Logiciel de calcul 109

15 Références 110

15.1 Références principales 110

15.2 Bibliographie 111

15.3 Références normatives 111

16 Annexe A: Bref historique et limites de la norme suisse actuelle 113

16.1 Simulations précédentes 113

16.2 Corrélation entre les facteurs λ_1 et λ_2 114

16.3 Incohérence de la norme suisse 117

17 Annexe B: Algorithmes pour le trafic ferroviaire 119

18 Annexe C: Résumé des lignes d'influence et de la longueur déterminante L_λ correspondante 122

19 Annexe D: Carte des différentes lignes ferroviaires 123

19.1 Matterhorn Gotthard Bahn 123

19.1.1 Andermatt-Dieni-Disentis 123

19.1.2 Fiesch-Oberwald-Andermatt 123

19.1.3 Oberwald-Realp 124

19.1.4 Zermatt-Täsch-Visp 124

19.2 Compagnie du chemin de fer Montreux Oberland Bernois 125

19.2.1 Montreux-Gstaad-Zweisimmen 125

19.2.2 Vevey-Les Pléiades 125

19.3 Rhätische Bahn 126

19.3.1 Landquart-Schiers 126

19.3.2 Samedan-Pontresina 126

19.3.3 Reichenau-Ilanz 127

19.3.4 Thusis-Bergün 127

19.3.5 Thusis-Samedan 128

19.4 Die Zentralbahn 129

19.4.1 Luzern-Hergiswil 129

19.4.2 Hergiswil-Sachseln 129

19.4.3 Sachseln-Giswil 130
19.4.4 Giswil-Meiringen 130
19.4.5 Meiringen-Interlaken Ost 131
19.4.6 Hergiswil-Stans 131
19.4.7 Stans-Wolfenschiessen 132
19.4.8 Wolfenschiessen-Engelberg 132

20 Annexe E: Paramètres des trafics ferroviaires utilisés 133

21 Annexe F: Logiciel de calcul MATLAB 135

Liste des figures

Figure 1.1 – Structure du rapport, divisé en deux parties selon la catégorie d'utilisateur 15
Figure 2.1 – Localisation possible d'une fissure de fatigue dans un pont (extrait de [28]). 16
Figure 2.2 – Courbes caractéristiques de résistance à la fatigue en fonction de la catégorie de détail (extrait de la SIA 263 [46]). 17
Figure 2.3 – Catégories de détails typiques pour la fatigue (extrait de [1]). 18
Figure 2.4 – Exemple d'histogramme et de calcul de dommages en fonction du niveau de $\Delta\sigma_i$ (note : les cycles sous la limite de troncature $\Delta\sigma_L/\gamma_{Mf}$ n'engendrent aucun dommage), adapté de [28]. 20
Figure 2.5 – Courbes des facteurs partiels λ_1 de la SIA 261:2020 (extraites de [44]). 23
Figure 2.6 – Volumes de trafic de référence pour le calcul du facteur partiel λ_2 de la SIA 261 : 2020 (extrait de [44]). 24
Figure 2.7 – Valeurs du facteur partiel λ_4 pour m = 5 de la SIA 261: 2020 (extrait de [44]) 25
Figure 2.8 – Définition de la longueur déterminante selon la SIA 261: 2020 (tout ouvrage). 26
Figure 2.9 – Modèle de charge 1, SIA 261:2020 26
Figure 2.10 – Modèles de charge 4 et 5 (extraits de [44]). 27
Figure 4.1 –Parcours des deux lignes à voie étroite utilisées dans le cas d'étude 34
Figure 4.2 – Poutre simple et sa ligne d'influence à mi-travée, L = 80 m 35
Figure 4.3 – Pont existant riveté, admis comme ayant été construit en 1915 35
Figure 4.4 – Pont existant riveté, positionnement des détails étudiés 36
Figure 4.5 – Pont existant riveté, lignes d'influence pour chacun des deux détails étudiés 37
Figure 4.6 – Calcul du coefficient partiel λ_1, cas RhB (à gauche) et MGB (à droite) 39
Figure 4.7 – Calcul du coefficient partiel λ_1 41
Figure 4.8 – Courbes λ_1 pour différentes lignes d'influence du trafic MGB Zermatt-Täsch-Visp 2019 43
Figure 5.1 – Étapes de l'algorithme permettant d'obtenir soit la catégorie de détail nécessaire pour atteindre un dommage égal à 1.00 à la fin de la durée de vie théorique (à gauche), soit de calculer le dommage pour une catégorie de détail spécifiée (à droite). 46
Figure 5.2 – Étapes de l'algorithme pour calculer le facteur λ_1 (adapté de [28]) 47
Figure 5.3 – Exemple de calcul des cycles selon la méthode rainflow 48
Figure 5.4 – Principe de comptage des cycles rainflow (extrait de [4]). 49
Figure 5.5 – Les différents systèmes statiques considérés dans les simulations. 50
Figure 5.6 – Réduction des contraintes (en vert) dû à la répartition de toute charge concentrée grâce à la dalle épaisse et au ballast. 51
Figure 5.7 – Réduction des contraintes dû à la répartition transversale de la charge. 51
Figure 6.1 – Comparaisons des facteurs dynamiques pour 4 lignes de trafic ferroviaire différentes

et des portées jusqu'à 100 m, exprimées en valeurs relatives par rapport à celles de l'annexe D de l'EN 1991-2 (DAF_{norme}/DAF_{ref}) 53
Figure 7.1 – Tableau Excel qui définis la géométrie de chaque train 57
Figure 7.2 – Tableau Excel qui définit les types de trains 58
Figure 7.3 – Plan du Matterhorn Gotthard Bahn 59
Figure 7.4 – Plan de la Compagnie du chemin de fer Montreux Oberland Bernois 60
Figure 7.5 – Plan des lignes de la compagnie Die Zentralbahn 62
Figure 7.6 – Géométries des trains de type 1 et 2 du « Standard traffic mix with axle weight ≤ 22.5 t » de la norme EN 1991-2 63
Figure 7.7 – Exemple de l'évolution du dommage sous trafic réel 64
Figure 8.1 –Lignes d'influence pour les cas 1S-MM et 3S-SM 67
Figure 8.2 – Véhicule, locomotive unique, utilisé dans l'exemple 67
Figure 8.3 – Train unique utilisé dans l'exemple 67
Figure 8.4 – Historique des contraintes (à gauche) et histogramme des cycles (à droite) de la ligne d'influence 1S-MM 68
Figure 8.5 – Historique des contraintes (à gauche) et histogramme des cycles (à droite) de la ligne d'influence 3S-SM 68
Figure 8.6 – Historique des contraintes (à gauche) et histogramme des cycles (à droite) de la ligne d'influence 1S-MM 69
Figure 8.7 – Historique des contraintes (à gauche) et histogramme des cycles (à droite) de la ligne d'influence 3S-SM 69
Figure 8.8 – Historique des contraintes (à gauche) et histogramme des cycles (à droite) de la ligne d'influence 1S-MM 70
Figure 8.9 – Historique des contraintes (à gauche) et histogramme des cycles (à droite) de la ligne d'influence 3S-SM 70
Figure 8.10 – Historique des contraintes (à gauche) et histogramme des cycles (à droite) de la ligne d'influence 1S-MM 71
Figure 8.11 – Historique des contraintes (à gauche) et histogramme des cycles (à droite) de la ligne d'influence 3S-SM 71
Figure 8.12 – Historique des contraintes (à gauche) et histogramme des cycles (à droite) de la ligne d'influence 1S-MM 72
Figure 8.13 – Historique des contraintes (à gauche) et histogramme des cycles (à droite) de la ligne d'influence 3S-SM 72
Figure 8.14 – Historique des contraintes (à gauche) et histogramme des cycles (à droite) de la ligne d'influence 1S-MM 73
Figure 8.15 – Historique des contraintes (à gauche) et histogramme des cycles (à droite) de la ligne d'influence 3S-SM 73
Figure 8.16 – Historique des contraintes (à gauche) et histogramme du cycle (à droite) de la ligne d'influence 1S-MM 74
Figure 8.17 – Historique des contraintes (à gauche) et histogramme des cycles (à droite) de la ligne d'influence 3S-SM 74
Figure 8.18 – Historique des contraintes (à gauche) et histogramme des cycles (à droite) de la ligne d'influence 1S-MM 75
Figure 8.19 – Historique des contraintes (à gauche) et histogramme des cycles (à droite) de la ligne d'influence 3S-SM 75
Figure 8.20 – Historique des contraintes (à gauche) et histogramme des cycles (à droite) de la ligne d'influence 1S-MM 76
Figure 8.21 – Historique des contraintes (à gauche) et histogramme des cycles (à droite) de la ligne d'influence 3S-SM 76
Figure 8.22 – Passage du train sur des portées de longueur différent 77
Figure 8.23 – Géométrie utilisé dans l'exemple 77
Figure 9.1 – Étapes de l'algorithme pour obtenir le facteur partiel λ_1 correspondant pour le trafic ferroviaire 80

Figure 9.2 – Comparaison entre la courbe λ_1 de la norme EN 1993-2:2006 pour les ponts ferroviaires et les simulations (en rouge) 81
Figure 9.3 – Comparaisons des courbes de l'EN 1993-2 (à gauche) avec les simulations EPFL des catégories de trafic de l'EN 1991-2 (à droite) 81
Figure 9.4 – Comparaison entre la courbe λ_1 de la norme EN 1993-2:2006 pour les ponts ferroviaires à écartement standard et les simulations (en rouge). 82
Figure 9.5 – Comparaison entre la courbe λ_1 de la norme EN 1993-2:2006 pour les ponts ferroviaires à écartement normal calculé avec LM71 (en rouge) et LM5 (en bleu). 83
Figure 9.6 – Comparaison entre la courbe λ_1 de la norme EN 1993-2:2006 pour les ponts ferroviaires à écartement standard utilisant LM5 calibré avec 25 Mio/tonnes (en bleu) par an et 12 Mio/tonnes par an (en vert) 84
Figure 10.1 – Calcul du facteur partiel λ_4 pour un pourcentage de croisement de 12% (extraite [44]). 87
Figure 11.1 – Courbes caractéristiques de résistance à la fatigue des détails en acier de construction selon EN 1993-1-9:2005 89
Figure 11.2 – Pentes m=3|5 (à gauche) et m = 4|6 (à droite) 89
Figure 11.3 – Extract of prEN 1992-1-1:2020 – Design parameters for S-N curves for reinforcing steel 90
Figure 12.1 –Résultats λ_1 brut, RhB : Landquart-Schiers, 2020 93
Figure 12.2 –Résultats λ_1 interpolé, RhB : Landquart-Schiers, 2020 94
Figure 12.3 –Résultats λ_1 fractile 95%, RhB : Landquart-Schiers, 2020 95
Figure 12.4 –Résultats λ_1, ensemble 2'268 courbes 95
Figure 12.5 –Courbes λ_1 correspondant à différents intervalles de confiance (ou caractéristiques) 101
Figure 12.6 –Courbe λ_1, nouvelle version pour modèle de charge 102
Figure 13.1 –Types de trams VBZ 103
Figure 13.2 –Facteurs de translation de la courbe λ_1 104
Figure 13.3 –Translation de la courbe $\lambda_{1,LM5}$ pour obtenir la courbe $\lambda_{1,LM4}$ 105
Figure 13.4 –Validation avec les trois lignes zurichoises 106
Figure 13.5 –Courbe λ_1, nouvelle version pour modèle de charge 4 106
Figure 14.1 –Courbe λ_1 modèle de charge 4 et 5 107
Figure 16.1 – Exemple de graphique dessiné trouvé dans la documentation et ayant servi pour la définition des courbes $\lambda 1$ de la SIA 261 (extrait de [6]). 113
Figure 16.2 – Courbes λ_1 pour le trafic ferroviaire à voie étroite de la norme SIA 263, 2003 (extraites de [45]). 114
Figure 16.3 – Modèles de charges de fatigue à appliquer SIA 261:2003 (extrait de [43]). 114
Figure 16.4 – Courbes du facteur partiel λ_1 pour le trafic routier de la norme SIA 263:2003 (extraites de [45]). 115
Figure 16.5 – Courbes du facteur partiel λ_1 de la SIA 261:2020 (extrait de [44]). 116
Figure 16.6 – Extrait des valeurs de référence du facteur partiel λ_2 de SIA 261:2020 (extrait de [44]). 116
Figure 16.7 – Courbes du facteur partiel λ_1 de la norme SIA 261:2020 (à gauche) et recalibrées sur le même volume de trafic de 10,6 Mio tonnes/an (à droit). 117
Figure 16.8 – Courbes du facteur partiel λ_1 de la norme SIA 261 pour le trafic ferroviaire à voie standard, comparaison 2003 (à gauche) et 2020 (à droite). 117

Liste des Tableaux

Tableau 4.1 –Résultats vérification avec la limite de fatigue 37
Tableau 4.2 –Résultats vérification avec le cumul de dommage 38
Tableau 4.3 – Détail du calcul avec la méthode lambda actuelle 40

Tableau 4.4 – Résultats vérification avec la méthode lambda actuelle 40
Tableau 4.5 – Détail du calcul avec la méthode lambda mise à jour 42
Tableau 4.6 – Résultats vérification avec la méthode lambda mise à jour 42
Tableau 4.7 – Comparaison méthode lambda entre la version actuelle et la version révisée 43
Tableau 4.8 – Réduction contrainte équivalente utilisant le cumul de dommages comparé avec la méthode lambda 44
Tableau 5.1 – Les différents types de lignes d'influence avec leurs acronymes 50
Tableau 6.1– Comparaison des différentes procédures de calcul du facteur d'amplification dynamique 52
Tableau 7.1 –Type des trains « Standard traffic mix with axle weight ⩽ 22.5 t » Tab. D.1 de la norme EN 1991-2 63
Tableau 7.2 –Calcul du coefficient dynamique, a) situation actuelle et b) proposition 65
Tableau 8.1 –Calcul du coefficient dynamique, situation actuelle et proposition 78
Tableau 12.1 – Résumé des valeurs cibles β_{tgt} de plusieurs normes (en gras les valeurs données dans les normes, les autres ont été calculées) 97
Tableau 12.2 – Résumé des valeurs du facteur de résistance en fatigue γ_{Mf} de plusieurs normes 97
Tableau 12.3 – Liste des différentes variables, types d'erreur ou incertitude, et leur influence 98
Table 12.4 – Valeurs de l'indice cible pour 100 ans, $\beta_{tgt,100}$, pour cette étude 100
Tableau 12.5 – Valeurs estimées pour le facteur de résistance 101
Tableau 13.1– Facteur de correction λ_2 pour les trois lignes 105

Liste des abréviations

CAFL	Constant Amplitude Fatigue Limit (Limite de fatigue sous amplitude constante)
COL	Cut-off Limit (Limite de troncature)
ELU	Etat Limite Ultime
ELS	Etat Limite de Service
FAT	Fatigue Class Equivalent stress (Contrainte équivalente)
FEM	Finite Element Method (Méthode des éléments finis)
FLM	Fatigue Load Model (Modèle de charge de fatigue)
IL	Influence Line (Ligne d'influence)
LM	Load Model (Modèle de charge ELU)
MM	Midspan Bending Moment (Moment fléchissant à mi-travée)
MV	Midspan Shear Force (Effort tranchant à mi-travée)
NDP	National Determined Parameter (paramètre déterminé au niveau national)
SIA	Société des ingénieurs et des architectes
SM	Support Bending Moment (Moment fléchissant sur appui)
SN	Swiss Norm
SV	Support Shear Force (Effort tranchant près d'un appui)
WIM	Weigh-in-Motion

Notations

Majuscules latines

A	Aire, section
D	Dommage total
L	Longueur de la portée
L_λ	Longueur déterminante pour la fatigue (pour la méthode lambda)
M	Moment fléchissant
N	Effort normal ; Nombre de cycles
N_0	Nombre d'essieux de référence par an
N_j	Nombre d'essieux par an dans la voie j
N_{obs}	Nombre total d'essieux par an
Q_0	Poids moyen par essieu de référence
Q_{fat}	Modèle de charge de fatigue
Q_i	Poids moyen par essieu des trains considérés
Q_{obs}	Poids moyen à l'essieu du trafic ferroviaire
Q_{mj}	Poids moyen par essieu du trafic ferroviaire sur la voie j
T_{Ld}	Durée de vie théorique du pont
T_{ref}	Durée de vie de référence du modèle
V	Force de cisaillement
V_0	Volume de référence du modèle par an
V_{obs}	Volume observé par an
W	Module de résistance de la section

Minuscules latines

d_m	Distance entre les essieux, valeur moyenne
d_{max}	Distance entre les essieux, valeur maximale
d_{min}	Distance entre les essieux, valeur minimale
j	Nombre des voies utilisées pour le calcul
m	Pente de la courbe de résistance à la fatigue (ou courbe S-N) ; si la courbe présente une double pente, m_1 et m_2
n_i	Nombre de trains considérés ; nombre de cycles considérés
v	Vitesse des trains

Majuscules grecques

Δ	Différence
Δσ	Différence de contraintes
$\Delta\sigma_C$	Catégorie de détail correspondant à 2 millions de cycles en N/mm^2
$\Delta\sigma_D$	Limite de fatigue sous amplitude constante (CAFL) correspondant à 5 millions de cycles en N/mm^2
$\Delta\sigma_L$	Limite de troncature sous amplitude variable correspondant à 100 millions de cycles en N/mm^2
$\Delta\sigma_{E2}$	Différence de contrainte équivalente, rapportée à 2 millions de cycles

	en N/mm^2
Φ	Coefficient dynamique, défini comme étant ≥ 1.0

Minuscules grecques

α	Facteur de la ligne d'influence
γ_{Ff}	Facteur partiel de sécurité des effets d'action en fatigue
γ_{Mf}	Facteur partiel de sécurité de résistance à la fatigue
λ	Facteur d'équivalence de dommage
λ_1	Facteur partiel pour l'effet du trafic prévu de référence
λ_2	Facteur partiel pour un volume de trafic différent
λ_3	Facteur partiel pour une durée de vie de l'ouvrage différente
λ_4	Facteur partiel qui tient compte de la circulation sur plusieurs voies
λ_{max}	Valeur maximale du facteur d'équivalence de dommage, compte tenu de la limite de fatigue
σ_{max}	Valeur maximale d'un cycle de contrainte
σ_{min}	Valeur minimale d'un cycle de contrainte
φ	Coefficient dynamique, défini comme $1+ \varphi \geq 1.0$
point décimal	Ce document combinant des informations de références en anglais et en français, le point et la virgule sont utilisés indifféremment.

Liste des logiciels

MATLAB R2020b	MATLAB combine une interface simple aux processus d'analyse et de calcul itératif avec un langage de programmation qui exprime directement les calculs mathématiques des matrices et des tableaux. Il comprend un éditeur Live pour la création de scripts qui combinent le code, la sortie et le texte dans un logiciel exécutable. (Source : www.mathworks.com)
Cubus Statik-8	STATIK est un programme pour l'analyse linéaire-élastique de structures bidimensionnelles et tridimensionnelles selon les théories du premier et du second ordre. Même en considérant la grande variété des possibilités de modélisation statique et d'évaluation des résultats, il se caractérise par un fonctionnement très simple et uniforme. Avec ses modules additionnels, il constitue un outil complet pour l'analyse des structures planes et spatiales. (Source : www.cubus-software.com)

1 Introduction

1.1 Contexte

La vérification à la fatigue des ponts ferroviaire (ou ponts-rails) existants à voie étroite se fait couramment à l'aide de la norme SIA 269 (SN 505 269), qui renvoie pour la plupart des éléments de ces vérifications à la SIA 261, Annexe G (SN 505 261). La correspondance entre la charge réelle sur une ligne de chemin de fer suisse et les modèles de calcul décrits dans la norme (LM4, LM5, LM6) est donnée par les différents facteurs d'équivalence de dommage λ, plus généralement appelée méthode lambda. Cette correspondance a été étudiée de manière approfondie dans les années 1980, puis révisée pour la dernière fois en 2003 en adaptant les courbes des trafics ferroviaires (voie standard et étroite) aux évolutions de trafic. En 2020, l'OFT, qui surveille la gestion du réseau des transports de la part des compagnies ferroviaires circulant sur des voies étroites, s'est interrogé sur la validité de cette correspondance en considérant les nouveaux véhicules ayant été mis en circulation depuis.

L'OFT a donc mandaté une étude préliminaire, qui a été effectuée par Haldimann Consulting [5], pour vérifier si la correspondance entre les charges actuelles et les modèles de calcul décrits dans la norme était encore valable. Dans cette étude, deux lignes des RhB et une ligne des ZB ont été analysées, avec comme conclusion que les sollicitations à la fatigue des ouvrages d'art causées par les trains actuellement en service sont parfois supérieures à celles décrites dans les normes. Plus précisément, l'importance des charges concentrées (charge par essieu) sur la durée de vie des ouvrages y est soulignée.

Pour cette raison, l'OFT a pris contact avec l'EPFL-RESSLab (Prof. A. Nussbaumer) pour effectuer une étude approfondie sur ce sujet, afin de mettre à jour les bases de calcul pour le dimensionnement des ponts ferroviaire (ou ponts-rails) à voie étroite et proposer une révision des normes actuellement en vigueur. Ce rapport est le résultat de cette étude, menée en collaboration avec un groupe de travail et les entreprises de transport participantes (voir Impressum). Il est constitué de deux parties :

- La partie I, incluant les Chapitres 1-4, destinés aux ingénieurs en charge de la vérification des ouvrages (entreprises de transport public, bureaux d'études, OFT).
- La partie II, incluant les Chapitres 5-13, ainsi que les annexes, destinés plutôt aux vérifications détaillées, aux experts de groupes de travail, par exemple pour les révisions futures des normes et qui ont besoin d'avoir une information plus détaillée quant aux hypothèses. Dans cette partie, une majorité de figures en anglais ont été inclues.

La structure du rapport est détaillée à la section 1.3.

1.2 Objectifs et contenu

Cette étude est principalement motivée par l'objectif d'améliorer la méthode lambda actuelle pour les ponts ferroviaires à voie étroite et concerne plus précisément les points suivants :

- Prise en compte des différents trafics ferroviaires actuels et futurs dans les modèles de charges en fatigue ;
- Amélioration de la méthode lambda en incluant plus de paramètres (dont certains ne sont pas pris en compte actuellement) ;
- Recalibration des courbes donnant les facteurs d'équivalence de dommage λ ;
- Établissement de catégories afin de différencier les lignes et calculs comparatifs avec celles-ci afin de confirmer/adapter éventuellement les différentes catégories.

Pour son travail, l'équipe de projet du RESSLAB utilise son propre logiciel, qui lui permet de réaliser efficacement des simulations de trafic et de déterminer les facteurs d'équivalence de dommage λ. Ce logiciel a été développé à l'origine pour les ponts routiers et utilisé pour proposer une nouvelle version des facteurs d'équivalence de dommage λ pour la nouvelle version de l'Eurocode EN 1993-2. Dans le cadre de cette étude, les adaptations et compléments nécessaires à son utilisation pour des modèles de charges ferroviaires ont été apportés.

Pour atteindre les objectifs susmentionnés, la méthodologie et les tâches à effectuer sont les suivantes :

- Validation des adaptations des algorithmes de notre logiciel selon la documentation D076 [4] et les normes actuelles par comparaison de calculs de cumul de dommage en fatigue ;
- Implémentation de différents types de lignes d'influence qui couvrent un grand nombre de cas pour les ponts ferroviaires, y.c. évaluation et éventuellement correction du calcul de la longueur déterminante L_λ ;
- Mise en œuvre de trafics ferroviaires réels (y.c. les géométries des trains) basés sur les données et prévisions de différents opérateurs d'infrastructure ;
- Définition de nouvelles courbes donnant les facteurs d'équivalence de dommage λ_1 pour les modèles de charge 4 et 5. Ceci comprend le traitement du facteur dynamique et l'établissement de catégories afin de différencier les lignes ;
- Prise en compte de la charge à l'essieu, en plus du tonnage total et du nombre de trains par jour dans la définition de la relation pour λ_2, qui réduit la dispersion et simplifie la méthode.

Les facteurs partiels λ_3, λ_4 et λ_{max} sont également étudiés, bien qu'en principe ils ne soient pas affectés par les géométries des trains, le nombre de trains, et d'autres paramètres liés à l'évolution du trafic ferroviaire. Le facteur partiel de volume de trafic λ_2 est directement lié au facteur partiel λ_1 et il est étudié en détail afin de proposer des corrections.

Différentes comparaisons ont été étudiées pour obtenir l'effet de chaque paramètre et ainsi améliorer au mieux la méthode lambda, en conservant sa simplicité d'utilisation, tout en incluant plus de paramètres afin de couvrir plus de cas. L'étude contient une analyse détaillée des résultats, des études de convergence, des analyses de sensibilité et des considérations de fiabilité et de statistique.

Le(s) modèle(s) de charge pour la voie étroite est et restera différent de celui pour la voie normale. Dans cette étude, il a été préféré de privilégier l'élimination des incohérences plutôt que de chercher une méthode reproduisant le modèle de l'Eurocode pour les voies normales. Il est à noter que les informations concernant la voie étroite ne seront pas intégrées dans les Eurocodes (mais plutôt comme NCCI dans l'annexe nationale à l'Eurocode 1991-2) car leur vérification restera une particularité suisse malgré l'abandon des normes SIA dans leur forme actuelle au profit des Eurocodes.

Les travaux futurs possibles suite à cette étude sont : développer un logiciel permettant de mettre à jour les valeurs λ pour des lignes ou situations futures non étudiées (sur la base de simulations de cumuls d'endommagement), compléter l'étude pour l'évaluation d'ouvrages existants avec leurs particularités, ainsi qu'effectuer une étude d'améliorations de la méthode lambda pour les ponts ferroviaires à voie normale.

1.3 Structure du rapport

Le rapport est constitué de deux parties (Figure 1.1) et il est destiné à deux catégories d'utilisateurs:

- Ingénieurs, mise à niveau — La partie I, qui correspond aux Chapitres 2, 3 et 4, est destinée aux ingénieurs qui veulent rafraîchir et mettre à niveau leurs compétences, qui

	doivent vérifier des ouvrages, qui connaissent ou non les normes liées à la fatigue, qui veulent comprendre ce qui a changé, pourquoi, et comment utiliser la nouvelle méthode de vérification, y.c. avec des exemples d'utilisation (entreprises de transport publics, bureaux d'études, OFT) ;
- Ingénieurs confirmés, experts	La partie II, ainsi que les annexes et les exemples du Chapitre 4, qui sont destinés aux ingénieurs confirmés devant effectuer une étude particulière pour un ouvrage, et aux experts (ingénieurs dans des groupes de travail, pour la rédaction des normes). Il leur faut une information plus détaillée (hypothèses, validation, composition des trafics, …).

La partie I commence par un chapitre qui présente les concepts de base du dimensionnement à la fatigue. Elle contient des explications pour permettre à l'ingénieur de se mettre à niveau et d'aborder plus facilement ce domaine particulier qu'est la vérification à la fatigue des ouvrages ferroviaires. Suit le chapitre 3, qui résume les changements dans la méthode lambda puis contient une version mise à jour de l'Annexe G de la SIA 261. Et finalement le chapitre 4 qui montre les étapes de calcul de la nouvelle méthode avec des exemples. Cette partie permet à l'ingénieur de vérifier directement une structure avec toutes les explications nécessaires.

La partie II, quant à elle, débute avec un chapitre qui explique les développements des algorithmes et des travaux effectués pour mettre à jour la norme actuelle. Cette partie est plus approfondie et nécessite de bonnes connaissances pour la comprendre entièrement. Elle a été prévue pour permettre de futurs développements et des mises à jour en conservant une trace des travaux effectués ces 30 dernières années.

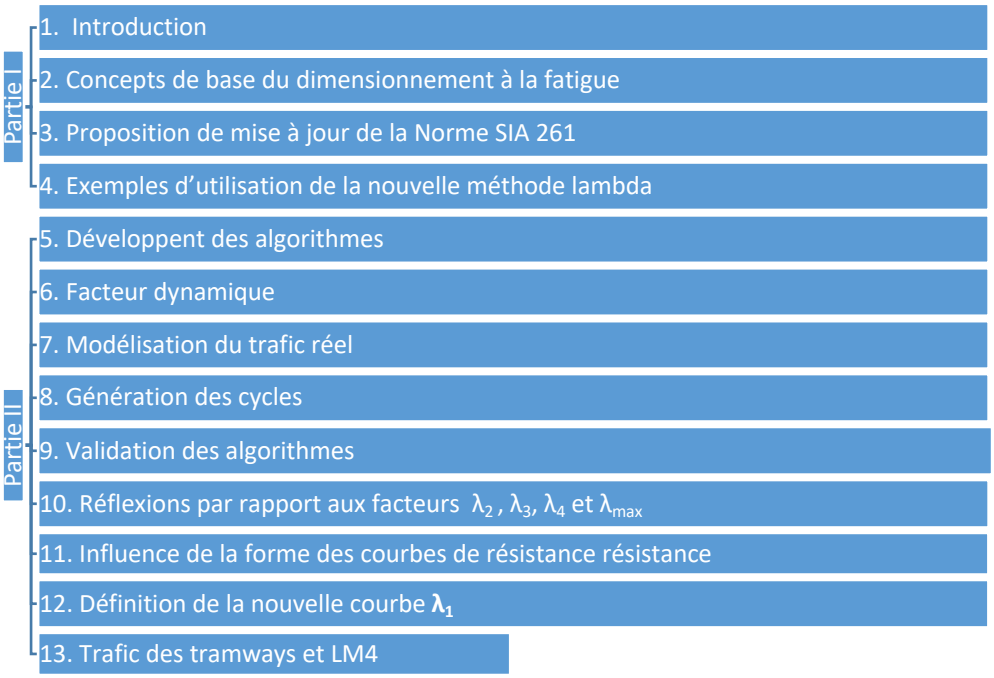


Figure 1.1 – Structure du rapport, divisé en deux parties selon la catégorie d'utilisateur

2 Concepts de base du dimensionnement à la fatigue

2.1 Relevance de la vérification de la fatigue

La fatigue, avec la corrosion et l'usure, est l'une des principales causes de dommages dans les structures en acier et se produit lorsque les éléments, les assemblages ou les joints qui la constituent sont soumis à des charges cycliques répétées, comme le trafic routier ou ferroviaire. Ce phénomène est amplifié dans les structures où la charge utile représente un pourcentage élevé des charges totales. Ceci est le cas des structures en acier ou en construction mixte, dont le rapport charges variables/charges permanentes est élevé (p.ex. par comparaison au béton, exception faite par exemple des dalles de tout type de pont), et pour lesquelles il faut absolument concevoir et vérifier les détails à la fatigue.

Les actions des chargements cycliques développent des fissures dans le matériau et peuvent provoquer la propagation des fissures jusqu'à la rupture de l'élément en raison de la perte de résistance. De nombreux chercheurs ont démontré comment les changements géométriques, la concentration des contraintes et les discontinuités influencent la formation et la propagation des fissures, voir par exemple la liste bibliographique [28].

La fissuration par fatigue se produit rarement dans le matériau de base, éloigné de tout détail d'usinage, de soudure ou d'assemblage. Elle se produit par exemple à l'extrémité d'un gousset comme montré à la Figure 2.1.

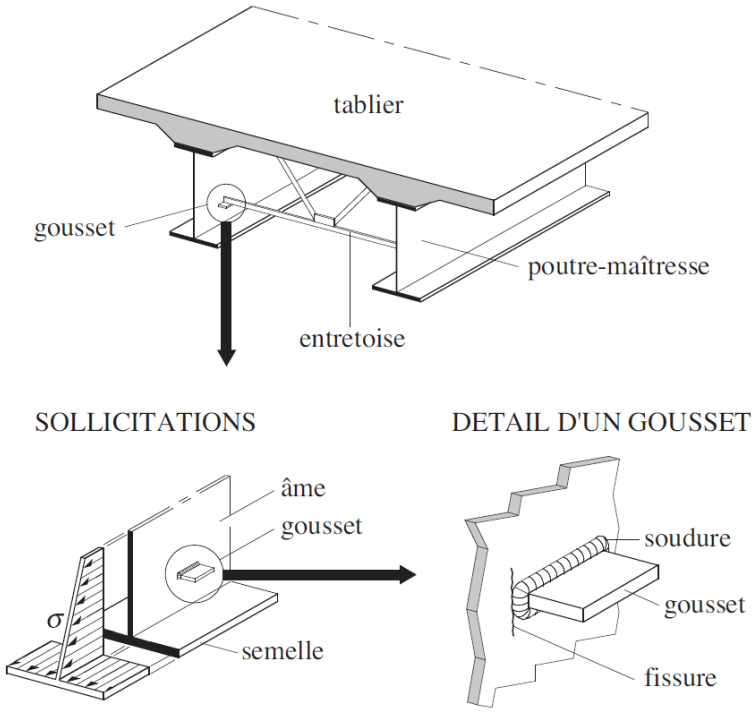


Figure 2.1 – Localisation possible d'une fissure de fatigue dans un pont (extrait de [28]).

2.2 Résistance des détails

Afin de connaître la résistance à la fatigue d'un détail de construction, il est essentiel d'effectuer des essais de fatigue dans lesquels des éprouvettes (d'un détail de construction ou d'un élément de structure) sont soumises à des sollicitations variables répétées. La durée de vie d'une éprouvette en

fatigue est définie comme le nombre de cycles de contraintes qu'elle peut supporter avant sa rupture. Il est nécessaire d'avoir un nombre suffisant d'essais pour inclure la dispersion des résultats. Cette dispersion provient des imperfections dues à la production et à l'exécution (par exemple, les effets des tolérances et des contraintes résiduelles dues au soudage). Les résultats obtenus sont reportés dans un diagramme en échelle bi-logarithmique avec le nombre de cycles (N) jusqu'à la rupture sur l'axe des abscisses, la différence de contrainte Δσ sur l'axe des ordonnées, puis les courbes de fatigue caractéristiques, comme nous pouvons le voir sur la Figure 2.2 (aussi connues sous le nom de courbes de Wöhler) Celles-ci correspondent aux différents détails de construction, et sont obtenues après analyses statistiques des résultats des essais.

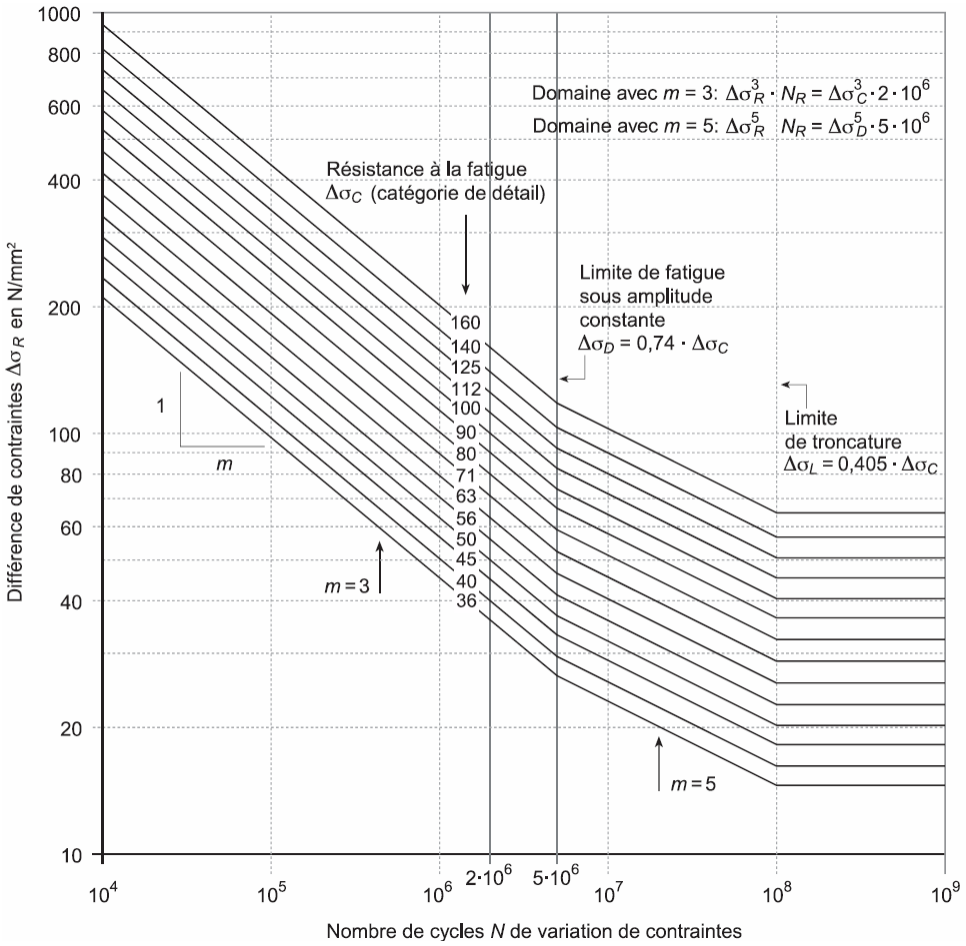


Figure 2.2 – Courbes caractéristiques de résistance à la fatigue en fonction de la catégorie de détail (extrait de la SIA 263 [46]).

Dans cette figure, les éléments les plus importants sont:

- N est le nombre de cycles [-] ;
- *m* est la pente de la courbe [-] ; si la courbe présente une double pente, m_1 et m_2 ;
- $\Delta\sigma_C$ est la résistance pour la catégorie de détail [MPa] ;
- $\Delta\sigma_D$ est la limite de fatigue à amplitude constante, correspond à $0{,}74 \cdot \Delta\sigma_C$ [MPa] pour $N_D = 5 \cdot 10^6$ cycles;
- $\Delta\sigma_L$ est la limite de troncature, correspond à $0{,}405 \cdot \Delta\sigma_C$ [MPa] pour $N_L = 1 \cdot 10^8$ cycles.

La valeur $\Delta\sigma_C$ représente la résistance du détail et correspond à un nombre de cycles de $2 \cdot 10^6$. La valeur $\Delta\sigma_D$ représente le point où la pente *m* passe généralement de 3 à 5 pour les détails en acier. Elle correspond au nombre de cycles de $5 \cdot 10^6$ (en général, mais peut être définie à un autre nb de cycles

en fonction du matériau, détail) ainsi qu'à la limite en-dessous de laquelle il n'y a pas de développement de fissure de fatigue sous des cycles d'amplitude constante, et même sous cycles d'amplitude variable sous la condition qu'aucun cycle du spectre ne dépasse $\Delta\sigma_D$. La partie des courbes au-delà de $5 \cdot 10^6$ cycles est la représentation du modèle de résistance sous amplitude variable (pour permettre des calculs de cumul de dommage). $\Delta\sigma_L$ correspond à la valeur à 10^8 cycles et représente la limite de troncature, limite en-dessous de laquelle il est possible de négliger les différences de contrainte pour les calculs de cumul de dommage. Les détails sont classés en fonction de leur géométrie et du type d'assemblage, comme il est possible de le voir sur la figure suivante.

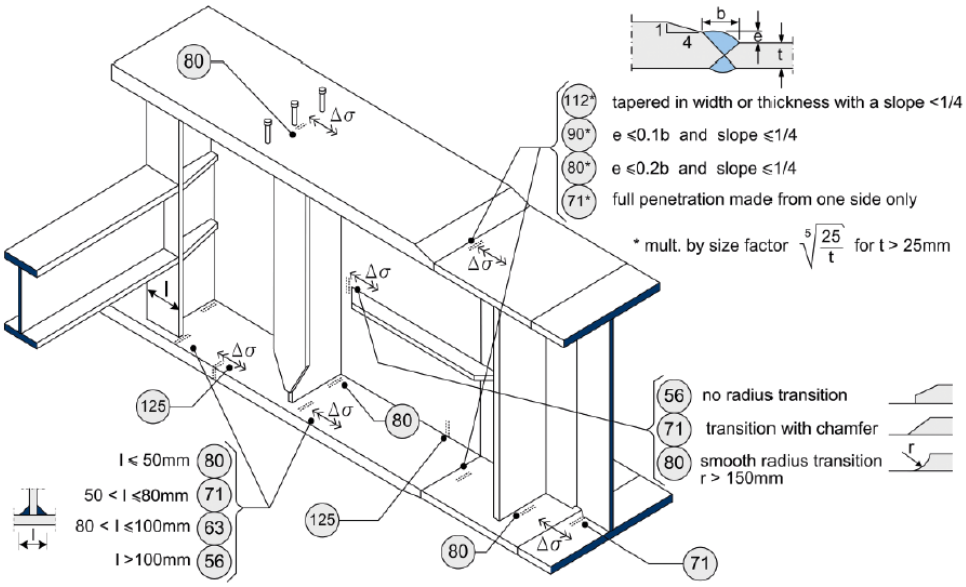


Figure 2.3 – Catégories de détails typiques pour la fatigue (extrait de [1]).

2.3 Vérifications de la fatigue

Pour vérifier la fatigue, il est possible de procéder avec trois méthodes différentes. Elles sont expliquées brièvement dans les sections 2.3.1 à 2.3.3 ci-après. Ce travail se concentre uniquement sur la dernière, la méthode d'équivalence de dommages. La formulation des vérifications en fatigue, ELU type 4, s'exprime comme suit :

$$E_d = \gamma_{Ff} E_k \leq R_d = R_k / \gamma_{Mf}$$

Les valeurs des facteurs partiels en fatigue (indice f) sont les suivantes :

- γ_{Ff} est le facteur partiel de charge, généralement pris égal à 1,0 [-] dans les normes ;
- γ_{Ff} est le facteur partiel de résistance, compris entre 1,00 et 1,35 en fonction des conséquences de la défaillance de l'élément [-] et du concept de sécurité en fatigue (voir Tableau 2.1), qui est exprimé de différentes manières mais reflète toujours l'idée suivante :
    - (a) Concept de tolérance aux dommages, avec inspections et possibilités de réparer,
    - (b) Concept de durée de vie sûre, sans inspection ou impossible à faire, aussi sans possibilité de réparer.

Tableau 2.1 – Résumé des valeurs du facteur de résistance en fatigue γ_{Mf}

Norme	Concept de sécurité	Conséquences de défaillance, dégâts	
		Peu importants (CC1 et CC2)	Importants (CC3)
SIA 263 :2013 (et EN1993-1-9 : 2005[a])	(a) Possibilité de constater et réparer les dommages	1,00	1,15
	(b) Impossibilité de constater et réparer les dommages	1,15	1,35
SIA 269/3 : 2011[b]	(a) Détail inspecté et sans dommage	1,00	1,00
	(b) Détail impossible à inspecter	1,15	1,35

[a] *les valeurs sont des NDP*
[b] *valeurs du facteur de résistance actualisé,* $\gamma_{Mf,act}$

2.3.1 Vérification avec la limite de fatigue

La vérification avec la limite de fatigue consiste à calculer la différence de contrainte maximale. Les essais ont montré que la durée de vie d'un détail tend vers l'infini lorsque toutes les variations de contraintes restent inférieures à la limite de fatigue $\Delta\sigma_D$ (limite de fatigue à amplitude constante):

$$\gamma_{Ff}\,\Delta\sigma_{i,max} \leq \frac{\Delta\sigma_D}{\gamma_{Mf}} \tag{2.1}$$

où :

- γ_{Ff} et γ_{Mf}, voir Tableau 2.1;
- $\Delta\sigma_{i,max}$ est la différence maximale des valeurs de l'histogramme des contraintes $\Delta\sigma_i$ dues aux charges d'exploitation [MPa] ;
- $\Delta\sigma_D$ est la limite de fatigue à amplitude constante du détail (obtenue à partir de Figure 2.2) [MPa].

Cette vérification est la plus conservative des trois. De plus, elle demande une connaissance des charges d'exploitation maximale (ou d'un modèle de charge qui les représente). C'est pourquoi cette vérification est la moins utilisée. Notons que certains ingénieurs et recommandations requièrent que tous les cycles restent sous $\Delta\sigma_L$, ce qui est trop conservateur et scientifiquement erroné, même si, avec uniquement des différences de contraintes dans cette zone, il est clair que la résistance du détail va tendre vers l'infini. Et notons pour terminer que dans le cas des voies normales, le modèle de charge de fatigue 1 selon la SIA 261 (correspondant au modèle de charge UIC71) peut être considéré comme correspondant bien aux charges d'exploitation maximales. Ce n'est pas le cas des modèles de charge actuels pour les voies étroites.

2.3.2 Vérification avec le cumul de dommage

La méthode de cumul de dommages considère l'histogramme des différences de contraintes $\Delta\sigma_i$ pendant la durée de service de la structure (ou d'une part représentative de cette dernière). Cette méthode est nettement plus complexe, car il est nécessaire obtenir l'historique des cycles de contraintes, puis le traiter afin de pouvoir l'exprimer en classes de différences de contraintes et nombre dans un histogramme des cycles. Ensuite, il est possible d'effectuer le cumul de dommage D et la vérification avec une formule de ce type (voir la littérature ou les Eurocodes EN 1990 et EN 1993-1-9 pour plus d'information, par ex. [28]) :

$$D = \sum_{i=1}^{k} \frac{N_{i,Ed}}{N_{i,Rd}} \leq 1{,}0 \tag{2.2a}$$

où :

- $N_{i,Ed}$ est la valeur de calcul du nb de cycles appliqués pour la différence de contraintes $\Delta\sigma_{i,Ed}$ dans l'histogramme
- $N_{i,Rd}$ est la valeur de calcul du nb de cycles à la rupture correspondant à la différence de contraintes $\Delta\sigma_{i,Ed}$

Pour pouvoir effectuer ce cumul, il faut calculer chaque valeur $N_{i,Rd}$ correspondant à chaque étendue de contraintes $\Delta\sigma_{i,Ed}$ (ici normales), et dépendant de son niveau par rapport à la limite de fatigue à amplitude constante $\Delta\sigma_D$ comme suit :

$$N_{i,Rd} = 2 \cdot 10^6 \left(\frac{\Delta\sigma_C/\gamma_{Mf}}{\Delta\sigma_{i,Ed}}\right)^{m_1} \text{ pour } \quad \Delta\sigma_{i,Ed} \geq \Delta\sigma_D/\gamma_{Mf} \tag{2.2b}$$

$$N_{i,Rd} = N_D \left(\frac{\Delta\sigma_D/\gamma_{Mf}}{\Delta\sigma_{i,Ed}}\right)^{m_2} \quad \text{pour} \quad \Delta\sigma_L/\gamma_{Mf} \leq \Delta\sigma_{i,Ed} \leq \Delta\sigma_D/\gamma_{Mf} \tag{2.2c}$$

Finalement, mais rarement utilisé en pratique, il est aussi possible d'obtenir une étendue de contrainte équivalente (en termes de dommage) et correspondant à $2{\cdot}10^6$ cycles, $\Delta\sigma_{E,2}$, pour ensuite effectuer la vérification comme suit (voir la littérature pour la détermination de cette valeur, par ex. [28]) :

$$\gamma_{Ff}\,\Delta\sigma_{E,2} \leq \frac{\Delta\sigma_C}{\gamma_{Mf}} \tag{2.3}$$

où :

- $\Delta\sigma_{E,2}$ est la valeur de la contrainte équivalente correspondant à $2{\cdot}10^6$ cycles [MPa] ;
- $\Delta\sigma_C$ est la résistance à la fatigue du détail à $2{\cdot}10^6$ cycles (obtenu à partir de Figure 2.2) [MPa].

La figure suivante montre un exemple d'histogramme et de cumul de dommages en fonction du niveau des cycles de contrainte et par rapport à une courbe de résistance à la fatigue donnée.

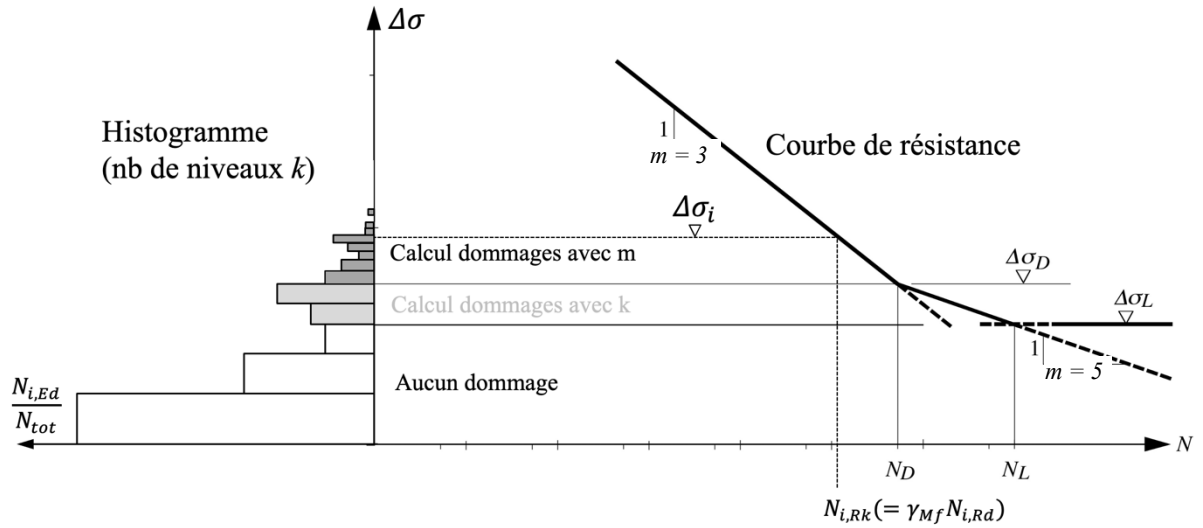


Figure 2.4 – Exemple d'histogramme et de calcul de dommages en fonction du niveau de $\Delta\sigma_i$ (note : les cycles sous la limite de troncature $\Delta\sigma_L/\gamma_{Mf}$ n'engendrent aucun dommage), adapté de [28].

2.3.3 Méthode d'équivalence de dommages

2.3.3.1 Description de la méthode

La vérification de la sécurité en fatigue pour un détail doit prendre en compte les dommages cumulés pendant la durée d'utilisation (ou de service) prévue en utilisant l'ensemble de l'histogramme des cycles de contraintes et la courbe de résistance à la fatigue dudit détail. La méthode d'équivalence de dommage (ou méthode lambda) fournit une procédure de vérification simplifiée qui permet d'effectuer une vérification sans faire de calculs de cumuls de dommage ni de déterminer de différence de contraintes équivalente à partir d'un histogramme. Pour ceci, un modèle de charge est utilisé pour calculer une différence de contraintes de référence et des facteurs d'équivalence de dommages sont appliqués pour obtenir le même effet que celui causé par le trafic prévu sur la structure (la structure étant nouvelle, il s'agit de prévisions):

$$\Delta\sigma_{E,2} = \lambda \cdot \Delta\sigma(Q_{fat}) \tag{2.4}$$

où :

- $\Delta\sigma_{E,2}$ est la différence de contrainte équivalente à amplitude constante correspondant à $2{\cdot}10^6$ cycles [MPa].
- λ est le facteur de dommage équivalent [-]
- $\Delta\sigma(Q_{fat})$ est la différence de contrainte générée par le modèle de charge de fatigue simplifié [MPa].

Le facteur équivalent de dommage λ est obtenu par le produit de quatre facteurs partiels:

$$\lambda = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \lambda_4 \quad \text{mais} \quad \lambda \leq \lambda_{max} \tag{2.5}$$

où

- λ_1 est le facteur partiel d'équivalence de dommage pour le trafic prévu de référence, en volume et durée, soit 100 ans selon la norme SIA 260 [-] ;
- λ_2 est le facteur partiel pour un volume de trafic prévu différent de celui de référence [-] ;
- λ_3 est le facteur partiel pour une durée d'utilisation prévue différente de la référence [-] ;
- λ_4 est le facteur partiel pour un pont avec du trafic ferroviaire sur plusieurs voies [-] ;
- λ_{max} est la valeur λ maximale qui exprime que le dimensionnement est fait par rapport à la limite de fatigue [-].

Chacun de ces facteur partiels est décrit plus en détail à la section 2.4. La vérification de la sécurité structurale à la fatigue consiste à vérifier que la valeur de calcul de la différence de contrainte équivalente n'est pas supérieure à la valeur de calcul de la résistance à la fatigue du détail considéré. La vérification s'exprime donc comme suit :

$$\gamma_{Ff} \cdot \lambda \cdot \Delta\sigma(Q_{fat}) \leq \frac{\Delta\sigma_C}{\gamma_{Mf}} \tag{2.6}$$

Cette méthode simple de vérification de la fatigue est rapide car elle évite tout calcul de cumul de dommages, qui prend beaucoup de temps car elle devrait être faite en déterminant les histogrammes correspondants à chaque section et détail de la structure. De plus, il est difficile de définir le trafic prévu et les paramètres de ce trafic (véhicules, fréquence, évolution, …) pour chaque structure. L'utilisation de la méthode simplifiée λ permet donc de vérifier la sécurité à la fatigue de manière simple et rapide en tenant compte des effets du trafic prévu.

Cependant, la méthode de l'équivalence des dommages est efficace uniquement si le facteur partiel d'équivalence de dommage pour le trafic prévu de référence λ_1 est bien calibré. Il doit être basé sur les données réelles et actuelles du trafic, ainsi que sur l'évolution future du trafic. Par conséquent, les valeurs du facteur partiel λ_1 doivent être régulièrement mises à jour pour refléter les effets du trafic actuel et futur sur les différentes lignes en Suisse. Les valeurs des autres facteurs partiels λ_i doivent également être confirmées lors de chaque mise à jour.

Notons que cette méthode de vérification a été développée pour la vérification à la fatigue de nouvelles structures. Elle peut cependant être adaptée, mais reste souvent très conservatrice à la vérification d'ouvrages existants. Dans ce cas, on parle de durée de service totale (somme entre la durée de service déjà écoulée et celle restante) et de trafic passé, actuel et prévisible.

2.3.3.2 Spécificité des ponts-rails, traitement du coefficient dynamique

Pour la vérification de la fatigue avec la méthode lambda, il est nécessaire à une étape du calcul d'introduire les effets dynamiques. Contrairement à ce qui est spécifié dans la norme SIA 261 actuelle, qui utilise le coefficient dynamique Φ comme multiplicateur de la charge de fatigue (i.e. $\Phi \cdot Q_{fat}$), il est proposé de le remplacer par le coefficient dynamique $1+\varphi$ de l'EN 1991-2, Annexe D, qui est plus réaliste car il dépend de la vitesse des trains. Notons que pour la fatigue, la version de 2023 de l'EN 1991-2 reprend les articles de celle de 2003, en particulier les annexes C et D. Le coefficient dynamique Φ correspond à l'amplification dynamique la plus défavorable, valeur maximale qui ne se produira qu'une fois au cours de la vie d'un ouvrage. Par contre les valeurs $1+\varphi$ des annexes C et D de l'EN sont plus proches de la réalité car l'amplification dynamique n'est jamais maximale pour chaque train durant la vie d'un ouvrage et elle dépend aussi de la vitesse des trains. Dans l'EN1991-2, il y a deux annexes:

- Annexe C, qui demande plus d'informations sur le trafic et qui devrait être utilisée pour faire des vérifications à l'LEU type 2, ou pour faire des simulations comme son titre l'indique « Dynamic factors $1+\varphi$ for Real Trains ».
- Annexe D, intitulée « Basis for the fatigue assessment of railway structures », qui reprend avec des simplifications les formules de l'Annexe C. Elle est destinée à être utilisée pour vérifier les ponts existants à la fatigue (bien qu'en principe cet Eurocode ait été rédigé d'abord pour les nouveaux ouvrages).

L'utilisation du facteur $1+\varphi$ permet une amélioration des prévisions par la méthode de calcul et est d'ailleurs déjà implémenté dans la norme SIA 269/1 pour la vérification en fatigue des ponts existants (Annexe A, Tableau 4) de la norme SIA 269/1. Notons ici l'utilisation différente des symboles Φ et $1+\varphi$ entre les SIA et EN pour les mêmes facteurs, donc incohérente entre les normes. Notons également que les valeurs des tableaux 3 et 4 de la SIA 269/1 sont liées à plusieurs hypothèses, pas toutes conservatrices.

Cette modification dans la méthode de calcul permet également de rendre les différentes normes plus cohérentes et de tenir compte des différents types de trafic. Son utilisation est décrite dans plusieurs exemples de calcul. Pour des explications justifiant ce changement et permettant la détermination du coefficient dynamique φ, le lecteur est renvoyé au chapitre 6 ainsi qu'à la section 7.5.

2.4 Méthode & valeurs des facteurs lambda (selon SIA 261 : 2020)

Les paragraphes suivants reprennent les différents facteurs partiels λ_i pour les nouvelles structures, définies dans la norme SIA 261: 2020 ainsi que pour les structures existantes, définies dans la norme SIA 269/1: 2011. Comme l'objectif de cette étude est de réviser la méthode, la lecture de cette section est facultative.

2.4.1 Facteur partiel pour l'effet du trafic λ_1

Ce facteur représente l'effet du trafic, en corrélant le modèle de charge de fatigue correspondant au trafic (agglomération, urbain, normal à locomotives) et au gabarit (A, B, ou C) prévus pour une ligne ; il dépend de la longueur déterminante pour la fatigue L_λ, dont la détermination fait l'objet d'un article de la norme et est expliqué à la section 2.5. Le graphique couvre des longueurs allant de 0 (théorique) à 100 m.

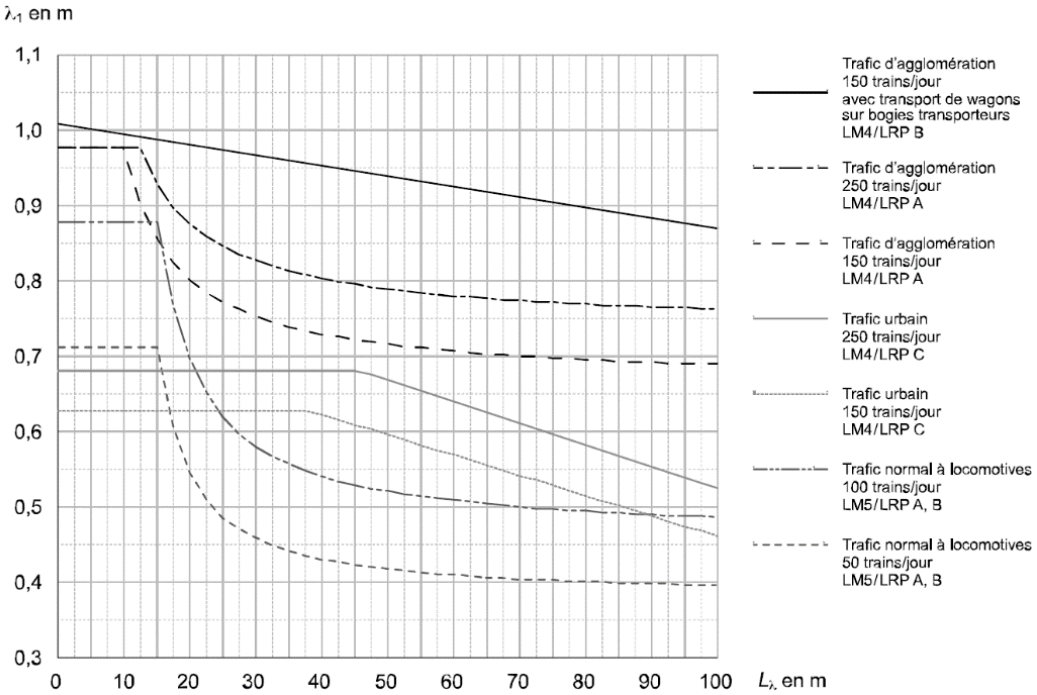


Figure 2.5 – Courbes des facteurs partiels λ_1 de la SIA 261:2020 (extraites de [44]).

La norme SIA 269/1: 2011, valable pour les structures existantes, utilise les même valeurs et graphique que pour les nouvelles structures, i.e. l'actualisation s'effectue donc via l'utilisation de λ_2, λ_3.

Notons que dans le cas de ponts à deux voies, le modèle de charge doit être placé sur les deux voies (article 12.1.).

2.4.2 Facteur partiel pour adapter le volume de trafic λ_2

Le facteur partiel λ_2 prend en compte un volume annuel du trafic différent de celui de référence pour la ligne. Il est fonction du volume observé V_{obs} et du volume de référence V_0.

$$\lambda_2 = \left(\frac{V_{obs}}{V_0}\right)^{\frac{1}{m}} \geq 1{,}0 \qquad (2.7)$$

où :

- V_{obs} est le volume du trafic [tonnes/an/voie] obtenu à partir des informations de l'opérateur ferroviaire ;
- V_0 est le volume du trafic de référence [tonnes/an/voie], c'est-à-dire sur lequel la courbe λ_1 correspondante a été calibré ;
- m est la pente la plus représentative de la courbe de Wöhler, généralement prise égale à 5 [-].

Modèle de trafic	Nombre de trains/jour	V_0 en t/an/voie
Trafic d'agglomération	250	$10{,}6 \cdot 10^6$
	150	$6{,}3 \cdot 10^6$
Trafic urbain	250	$5{,}7 \cdot 10^6$
	150	$3{,}4 \cdot 10^6$
Trafic normal à locomotives, avec ou sans transport de wagons sur trucs	100	$6{,}4 \cdot 10^6$
	50	$3{,}2 \cdot 10^6$

Figure 2.6 – Volumes de trafic de référence pour le calcul du facteur partiel λ_2 de la SIA 261 : 2020 (extrait de [44]).

La norme SIA 269/1: 2011, valable pour les structures existantes, propose d'utiliser une valeur égale à 1,00 par défaut, partant du principe que prendre le volume moyen sur toute la durée de service d'une structure existante V_{obs} égal à la valeur de référence V_0 est conservateur.

2.4.3 Facteur partiel pour adapter la durée de service de l'ouvrage λ_3

Le facteur partiel λ_3 prend en compte la durée de service du pont, cette valeur est rapportée à une durée de service de référence de 100 ans.

$$\lambda_3 = \left(\frac{T_{Ld}}{T_{ref}}\right)^{\frac{1}{m}} \tag{2.8}$$

où :

- T_{Ld} est la durée de service prévue du pont [an] ;
- T_{ref} est la durée de service de référence, égale à 100 [an] ;
- m est la pente la plus représentative de la courbe de Wöhler, généralement égale à 5 [-].

La norme SIA 269/1:2011 pour les structures existantes utilise la même formule (2.8), à l'exception de la valeur de la pente m, qui est fixée égale à 5 alors que la SIA 261:2020 admet d'autres valeurs pour certains détails, soit m = 7 pour les détails d'armatures des structures en béton et m = 8 pour les goujons en cisaillement (§ G.1.4, SIA 261: 2020) ; ces valeurs plus élevées de m conduisent à des valeurs plus proches de l'unité pour ce facteur. Pour les cas $T_{Ld} > T_{ref}$, la norme SIA 269/1: 2011 est donc non-conservatrice pour les détails avec m > 5 ; elle devra donc être révisée pour prendre en compte les derniers développements.

2.4.4 Facteur partiel pour adapter à un trafic sur plusieurs voies λ_4

Le facteur partiel λ_4 prend en compte le trafic sur plusieurs voies et donc la répartition transversale des efforts qui est utilisée pour déterminer les contraintes à la fatigue dues aux différentes voies. Il faut noter que le calcul est valable pour au maximum deux voies, le croisement sur trois voies est un événement trop rare pour être considéré dans l'endommagement en fatigue.

$$\lambda_4 = \sqrt[m]{n + (1-n) \cdot a^m + (1-a)^m} \tag{2.9}$$

$$a = \Delta\sigma_1 / (\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2)$$

où :

- n est le pourcentage du trafic avec croisement sur le pont [-] ;
- $\Delta\sigma_1$ est la différence de contrainte générée par le modèle de charge de fatigue sur la voie principale, $\Delta\sigma_1 \geq \Delta\sigma_2$ [N/mm^2] ;
- $\Delta\sigma_2$ est la différence de contrainte générée par le modèle de charge de fatigue sur la deuxième voie [N/mm^2].

La norme SIA 261 donne les valeurs correspondant au cas considéré comme usuel, voir la Figure 2.7. La norme SIA 269/1: 2011, valable pour les structures existantes, se réfère à cette dernière, i.e., aux valeurs pour les nouvelles structures.

$\Delta\sigma_1/(\Delta\sigma_1+\Delta\sigma_2)$	1,00	0,90	0,8	0,70	0,60	0,50
λ_4 (12% de croisements, m = 5)	1,00	0,91	0,84	0,77	0,72	0,71

Figure 2.7 – Valeurs du facteur partiel λ_4 pour m = 5 de la SIA 261: 2020 (extrait de [44]).

2.4.5 Facteur λ_{max} fixant la borne supérieure

Le facteur λ_{max} représente la limite supérieure qui peut être atteinte par la combinaison des quatre facteurs partiels λ_i . Ce facteur est égal à 1,40 pour les nouvelles structures (SIA 261) alors qu'il n'est pas mentionné pour les structures existantes (SIA 269/1).

2.5 Définition de la longueur déterminante L_λ

Lors du calcul à l'aide de la méthode lambda, l'emplacement du détail et la ligne d'influence en rapport avec l'effort intérieur sollicitant, ont une grande importance pour la détermination de sa longueur déterminante L_λ. Cette détermination fait l'objet de l'article G.6 de la norme SIA 261: 2020 (il s'agit de la reprise d'un article de la EN 1993-2: 2005). Pour chaque détail, le facteur λ doit tenir compte de l'effet du trafic réel. Pour cette raison, la ligne d'influence et sa longueur déterminante doit tenir compte de l'axe de roulement des trains du début à la fin du pont. La définition de la longueur déterminante dépend en particulier du système statique et de l'emplacement du détail considéré. L'article G.6 fournit les règles pour la déterminer et il est reproduit à la Figure 2.8. L'étude présentée dans ce rapport applique ces règles et démontre qu'elles fonctionnent bien. Elles permettent de bien ajuster les différentes courbes λ_1 correspondant aux différents systèmes statiques (voir chapitre 12).

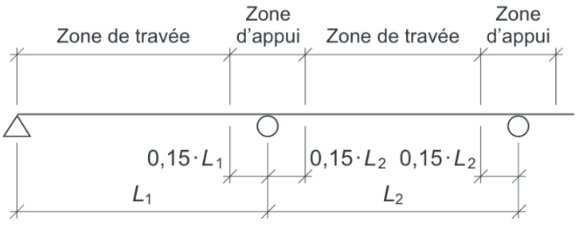
Plus généralement, pour déterminer la longueur déterminante L_λ, car il existe de nombreux cas qui ne sont pas décrits, il faut procéder en déterminant puis en analysant la forme de la ligne d'influence. Il faut trouver le cycle maximal qui peut être généré et le comparer, par référence ou analogie, avec des cas connus. Le plus souvent, L_λ = distance entre les positions de la charge Q=1 pour le pic principal qui se termine avec σ = 0; il est à noter qu'il est préférable de sous-estimer la longueur déterminante L_λ car plus elle est petite, plus le calcul est conservateur (i.e. avec la forme des courbes λ_1, pour les ouvrages ferroviaires, une faible longueur L_λ implique un facteur partiel λ_1 qui augmente).

Notons pour terminer que les règles de de l'article G.6 sont supposées s'appliquer tant au trafic routier qu'au trafic ferroviaire, or il a été démontré que les règles actuelles ne sont pas bien adaptées pour le trafic routier par rapport au modèle de charge pour ce trafic. Des corrections ont donc été proposées pour le trafic routier [40] ; il en est tenu compte dans notre mise à jour de la norme (chapitre 3).

G.6 **Détermination de la longueur déterminante pour la fatigue**

G.6.1 Afin de déterminer la longueur déterminante pour la fatigue L_λ, on différencie les zones de travée et d'appui telles que définies dans la figure 28.

Figure 28 Définition des zones de travée et d'appui



G.6.2 Dans le cas de contraintes provenant d'un moment de flexion, L_λ, est déterminée comme suit :
- pour une poutre isostatique : la portée L_1,
- pour une poutre continue, dans les zones de travée : la portée L_i de la travée considérée (voir figure 28),
- pour une poutre continue, dans les zones d'appui : la portée moyenne des travées adjacentes à cet appui L_i et L_j (voir figure 28),
- pour les poutres transversales portant des augets ou des supports de rails : la somme des portées des deux travées adjacentes aux augets ou des supports de rails reliés aux poutres transversales,
- pour une tôle supportée uniquement par des poutres transversales ou des pièces de pont (aucun élément longitudinal) : la longueur de la ligne d'influence utilisée pour calculer la flèche de la tôle, en ignorant toute partie qui indique une flèche vers le haut. Il en va de même pour les poutres transversales elles-mêmes. Dans les ponts-rails, la rigidité des rails sur la distribution des charges doit être considérée.

G.6.3 Dans le cas de contraintes provenant d'un effort de cisaillement, L_λ est déterminée comme suit :
- pour une section dans les zones d'appui : la portée L_i de la travée considérée (voir figure 28),
- pour les secteurs en travée : $0{,}4 \cdot L_i$ (L_i étant la portée de la travée considérée) (voir figure 28).

G.6.4 Dans le cas de contraintes déduites d'une réaction d'appui, L_λ est déterminée comme suit :
- pour les culées (par ex. appuis d'extrémité) : la portée L_i de la travée considérée,
- pour les appuis intermédiaires : la somme des portées L_i et L_j des travées adjacentes.

Figure 2.8 – Définition de la longueur déterminante selon la SIA 261: 2020 (tout ouvrage).

2.6 Modèles de charge de fatigue

2.6.1 Introduction

Pour représenter les différents types de trains et de trafic, plusieurs modèles de charge ont été développés et figurent dans la norme SIA 261: 2020. Il faut ainsi différencier les modèles de charge pour la voie normale de ceux pour la voie étroite.

Pour information, le modèle de charge de base pour le trafic ferroviaire à voie normale est représenté à la Figure 2.9. Ce modèle de charge 1 est identique au modèle de charge UIC 71 de l'Eurocode EN 1991-2: 2003.

Modèle de charge 1

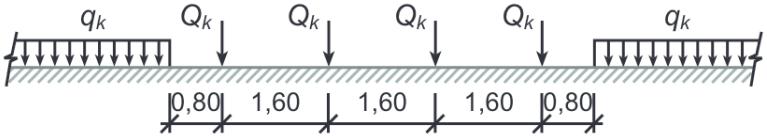
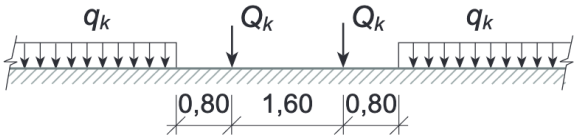


Figure 2.9 – Modèle de charge 1, SIA 261: 2020

2.6.2 Voies étroites, modèles de charge de fatigue 4 et 5

Pour le trafic ferroviaire à voie étroite, la norme SIA 261: 2020 contient les 4 modèles. Cependant, pour les vérifications à la fatigue, seuls les modèles de charge 4 et 5 sont utilisés. Ils sont les deux représentés par une seule géométrie et différentes valeurs de charges caractéristiques. Notons que l'Eurocode ne contient ni de modèles de charge, ni de vérification pour ce type de voies.



Modèle de charge	Q_k [kN]	q_k [kN/m]
4	130	25
5	160	50

Figure 2.10 – Modèles de charge 4 et 5 (extraits de [44]).

3 Proposition de mise à jour de la Norme SIA 261

3.1 Introduction

Dans cette étude, pour résoudre les incohérences de la norme, améliorer la précision des courbes pour le facteur de dommage équivalent et rendre le calcul plus fiable, comme décrit en détail dans le rapport, nos réflexions nous ont conduit à proposer les changements résumés ci-après :

1) Facteur dynamique : le facteur dynamique a été remplacé selon les indications du paragraphe 2.3.3.2. Pour plus de détails, se référer au chapitre 6.
2) Facteur partiel λ_1 : Les courbes du facteur partiel pour l'effet du chargement du trafic ont été recalibrées et une version tabulaire a été intégrée. Le nombre des courbes a été simplifié.
3) Facteur partiel λ_2 : Le calcul du facteur partiel pour le volume du trafic a été modifié dans ses volumes de référence en introduisant de nouvelles équations.
4) Coefficient de pente de la courbe de résistance à la fatigue *m* : la valeur correcte à utiliser pour les vérifications a été clarifiée.
5) La manière de déterminer la longueur déterminante $\boldsymbol{L_\lambda}$ pour la fatigue a été différenciée entre ponts routiers et ponts ferroviaires car les modèles de charges de fatigue sont différents.
6) Pour des conseils additionnels par rapport à la détermination de $\boldsymbol{L_\lambda}$, le lecteur est renvoyé aux explications de la section 2.5.

Il reste encore quelques points et des limites à la norme qui pourraient être améliorés, ils sont donnés dans le chapitre 14 de ce rapport.

Les chiffres de la norme SIA 261 mise à jour selon les résultats du présent rapport sont présentés avec les améliorations proposées. **La numérotation des chapitres de la section suivante ne suit donc pas la numérotation du rapport mais celle de la norme SIA 261: 2020.** Les chiffres de la norme SIA 261 qui ne changent pas, ne sont pas mentionnés dans ce rapport. Notons que ces propositions sont également à prendre en compte pour réviser la SIA 269/1.

3.2 Proposition

12.2 Modèles de charge et valeurs caractéristiques

12.2.1 Charges dues au trafic ferroviaire

12.2.1.1 Les charges dues au trafic ferroviaire seront prises en compte à l'aide des cinq modèles de charge décrits dans la figure 17 et le tableau 17.

Pour la fatigue, seuls les modèles 4 et 5 sont considérés.

– Modèle de charge 4 représente l'effet statique du trafic urbain (gabarits d'espace libre C et A) ou du trafic d'agglomération (gabarit d'espace libre A)

– Modèle de charge 5 représente l'effet statique du trafic normal à locomotives, avec ou sans transport de wagons sur trucs ou bogies transporteurs (gabarits d'espace libre A et B)

12.2.1.2 Les valeurs caractéristiques des modèles de charge 4 à 7 doivent être multipliées par le coefficient dynamique Φ selon le chiffre 11.3.1, excepté pour les vérifications à la fatigue, où l'Annexe H, tableau 80 s'applique.

Figure 17 Modèles de charge sur les lignes ferroviaires à voie étroite (dimensions en m)

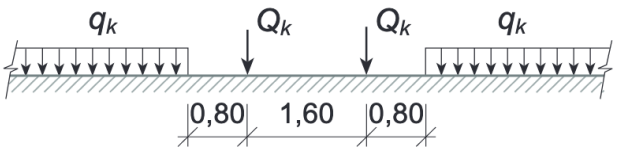


Tableau 17 Valeurs caractéristiques des charges dues au trafic ferroviaire à voie étroite

Modèle de charge	Q_k [kN]	q_k [kN/m]
4	130	25
5	160	50

12.4 Fatigue

12.4.1 Généralités

12.4.1.1 Pour les structures porteuses des lignes ferroviaires, la résistance à la fatigue de tous les éléments porteurs soumis à des sollicitations répétées sera étudiée.

12.4.1.2 Le chiffre G.4.2. de l'annexe G fournit des indications sur le volume du trafic sur les lignes à voie étroite. Le volume devant être considéré est fixé par l'exploitant de l'infrastructure.

12.4.1.3 La durée d'utilisation sera de 100 ans, pour autant qu'elle ne soit pas fixée différemment dans la convention d'utilisation.

12.4.1.4 Dans le cas où aucune vérification en fatigue simplifiée ne peut être faite, on appliquera les SN EN 1993-1-9 et SN EN 1992-2 qui décrivent la vérification avec le cumul de dommage.

12.4.2 Modèle de charge de fatigue

12.4.2.1 On utilisera le modèle de charge 4 ou 5 pour la vérification de la sécurité structurale à la fatigue. On tiendra compte des influences des forces centrifuges. Les forces de lacet et les forces dues au démarrage et au freinage peuvent généralement être négligées.

12.4.2.2 Pour les structures porteuses comportant plusieurs voies, le modèle de charge de fatigue sera appliqué sur deux voies au maximum, les charges étant en position défavorable.

G.1 Facteur global d'équivalence de dommage λ pour la fatigue engendrée par les charges de service (les dispositions de ces chiffres s'appliquent sans changement avec la nouvelle méthode lambda. On les répète ci-dessous par convenance)

G.1.1 Aucun changement, consulter SIA 261: 2020

G.1.2 Aucun changement, consulter SIA 261: 2020

G.1.3 Aucun changement, consulter SIA 261: 2020

G.1.4 Aucun changement, consulter SIA 261: 2020

G.3.4 (Note: aucun changement) Si le pourcentage du trafic se croisant sur le pont est différent de la valeur recommandée de 12%, le facteur partiel λ_4 doit être calculé comme suit :

$$\lambda_4 = \sqrt[m]{n + (1-n) \cdot a^m + (1-a)^m} \quad (55)$$

$$a = \Delta\sigma_1/(\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2)$$

n pourcentage de trafic qui traverse le pont en même temps

Si $\Delta\sigma_1$ et $\Delta\sigma_2$ sont de signes opposés, le pourcentage de trafic qui traverse le pont en même temps prend la valeur *n* = 0.

G.4 Facteurs partiels d'équivalence de dommage pour le trafic ferroviaire à voie étroite

G.4.1 La valeur du facteur partiel λ_1 sera tirée de la figure 26, en tenant compte du volume du trafic. Pour obtenir le facteur partiel λ_4, on se référera au chiffre G.3.4.

G.4.2 Facteur partiel λ_2

G.4.2.1 Lorsque le volume du trafic ne dépasse pas, pendant toute la durée d'utilisation, la valeur de référence correspondant au modèle de trafic considéré en appliquant λ_1, conservativement il faut prendre λ_2 = 1,0. Si le volume du trafic diffère de la valeur de référence du modèle de trafic considéré en appliquant λ_1, le facteur partiel λ_2 peut être déterminé de manière simplifiée à l'aide de l'équation (56):

$$\lambda_2 = \left(\frac{V_{obs}}{V_0}\right)^m \quad (56)$$

V_{obs} = volume du trafic par année et par voie, d'après les indications fournies par l'exploitant de l'infrastructure. Sans indication, il sera pris égal à V_0

V_0 = volume du trafic de référence par année et par voie, pris égal à $12 \cdot 10^6$ tonnes

G.4.2.2 Pour des calculs plus précis, le facteur partiel λ_2 peut être déterminé avec l'équation (57):

$$\lambda_2 = \frac{Q_{obs}}{Q_0} \cdot \left(\frac{N_{obs}}{N_0}\right)^{\frac{1}{m}} \quad (57)$$

Avec $\lambda_2 \geq 1{,}0$.

Où :

- Q_{obs} Poids moyen par axe du trafic réel sur l'ouvrage [kN]
- Q_0 Poids moyen par axe du modèle, égal à 120 [kN]
- N_{obs} Nombre d'axes total du trafic réel sur l'ouvrage [n/année]
- N_0 Nombre d'axes total du modèle, égal à 1 Mio [n/année]
- *m* pente de la courbe de résistance à la fatigue, voir chiffre G.1.4

Le calcul de Q_{obs} se fait selon la formule suivante :

$$Q_{obs} = \left(\frac{\sum n_i Q_i{}^m}{\sum n_i}\right)^{\frac{1}{m}}$$

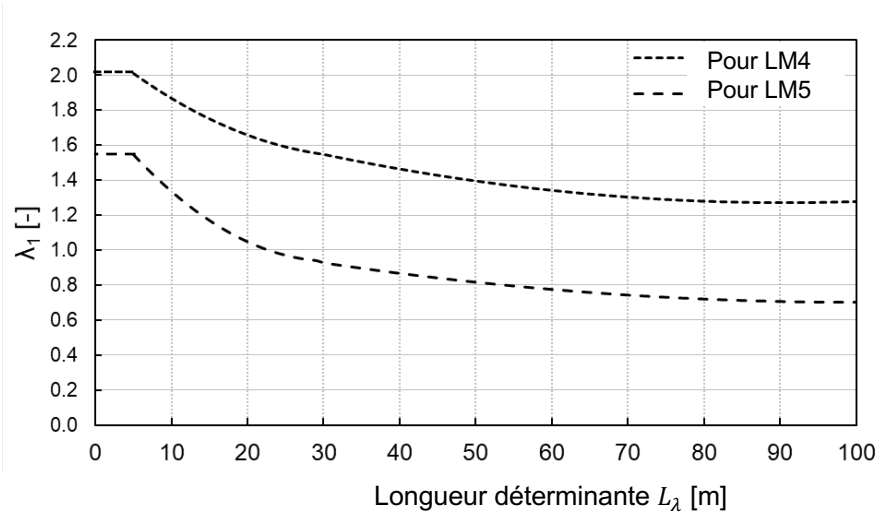
Avec:

- Q_i Poids d'axe [kN]

- n_i nombre d'axe considéré [–]
- *m* pente de la courbe de résistance de la fatigue, voir chiffre G.1.4

G.4.3 La limite supérieure du facteur global d'équivalence de dommage du trafic ferroviaire à voie étroite se monte à $\lambda_{max} = 1,4$.

Figure 26 Facteur partiel λ_1 pour le trafic ferroviaire à voie étroite



Valeurs de la figure 26 sous forme tabulaire :

LM4 :

L_λ [m]	λ_1 [-]
0,5	2,01
5	2,01
6	1,98
7	1,95
8	1,92
9	1,90
10	1,87
12	1,82
15	1,75
17	1,71
20	1,66
25	1,59
30	1,55
35	1,51
40	1,47
45	1,43
50	1,40
60	1,34
70	1,31
80	1,29
90	1,28
100	1,28

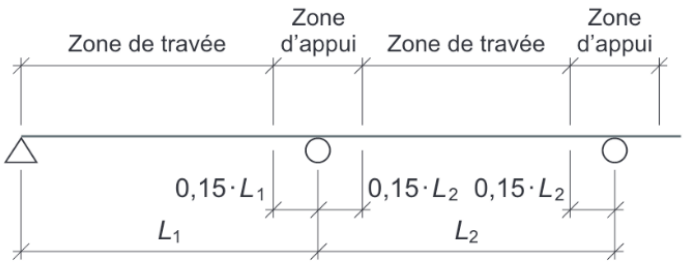
LM5 :

L_λ [m]	λ_1 [-]
0,5	1,54
5	1,54
6	1,50
7	1,46
8	1,41
9	1,37
10	1,33
12	1,26
15	1,17
17	1,11
20	1,05
25	0,97
30	0,93
35	0,89
40	0,87
45	0,84
50	0,82
60	0,77
70	0,74
80	0,72
90	0,70
100	0,70

G.6 Détermination de la longueur déterminante L_λ pour la fatigue

G.6.1 (Note: aucun changement) Afin de déterminer la longueur déterminante pour la fatigue L_λ, on différencie les zones de travée et d'appui telles que définies dans la figure 28.

Figure 28 Définition des zones de travée et d'appui



G.6.2 (renumérotation) Pour le trafic routier

G.6.2.1 à G.6.2.3 Concernent le trafic routier (hors sujet, à rédiger à l'aide de la publication [40])

G.6.3 Pour le trafic ferroviaire (à voie normale et étroite)

G.6.3.1 Dans le cas de contraintes provenant d'un moment de flexion, L_λ est déterminée comme suit :

- pour une poutre isostatique: la portée L_1,
- pour une poutre continue, dans les zones de travée: la portée L_i de la travée considérée (voir figure 28),
- pour une poutre continue, dans les zones d'appui: la portée moyenne des travées adjacentes à cet appui L_i et L_j (voir figure 28),
- pour les poutres transversales portant des augets ou des supports de rails: la somme des portées des deux travées adjacentes aux augets ou des supports de rails reliés aux poutres transversales,
- pour une tôle supportée uniquement par des poutres transversales ou des pièces de pont (aucun élément longitudinal): la longueur de la ligne d'influence utilisée pour calculer la flèche de la tôle, en ignorant toute partie qui indique une flèche vers le haut. Il en va de même pour les poutres transversales elles-mêmes. La rigidité des rails sur la distribution des charges doit être considérée.

G.6.3.2 Dans le cas de contraintes provenant d'un effort de cisaillement, L_λ est déterminée comme suit :

- pour une section dans les zones d'appui: la portée L_i de la travée considérée (voir figure 28),
- pour les secteurs en travée: 0,4· L_i (L_i étant la portée de la travée considérée) (voir figure 28).

G.6.3.3 Dans le cas de contraintes déduites d'une réaction d'appui, L_λ est déterminée comme suit :

- pour les culées (par ex. appuis d'extrémité): la portée L_i de la travée considérée,
- pour les appuis intermédiaires: la somme des portées L_i et L_i des travées adjacentes.

Annexe H (nouvelle)

Tableau 80 Coefficients dynamiques ϕ_{fat} = 1+ φ à utiliser pour la vérification de la sécurité structurale à l'état limite de type 4 (fatigue). Selon Annexe D de EN 1991-2[1], référence [34]

L_λ [m]	Vitesse maximale autorisée pour les classes de lignes et les trains en service [km/h]														
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	120	140	160	180	200
1	1,15	1,16	1,17	1,18	1,19	1,20	1,21	1,22	1,23	1,24	1,27	1,30	1,33	1,36	1,40
2	1,14	1,15	1,16	1,17	1,18	1,19	1,20	1,22	1,23	1,24	1,27	1,29	1,33	1,36	1,39
4	1,13	1,14	1,15	1,16	1,17	1,18	1,19	1,20	1,21	1,22	1,25	1,28	1,31	1,34	1,38
6	1,11	1,12	1,13	1,13	1,15	1,16	1,17	1,18	1,19	1,20	1,23	1,26	1,29	1,32	1,36
8	1,08	1,09	1,10	1,11	1,12	1,13	1,14	1,15	1,17	1,18	1,21	1,23	1,26	1,30	1,33
10	1,06	1,07	1,08	1,09	1,10	1,11	1,12	1,13	1,14	1,16	1,18	1,21	1,24	1,28	1,31
15	1,02	1,03	1,04	1,05	1,06	1,07	1,08	1,10	1,11	1,12	1,15	1,17	1,21	1,24	1,27
20	1,01	1,02	1,03	1,04	1,05	1,06	1,07	1,08	1,10	1,11	1,13	1,16	1,19	1,23	1,26
25	1,01	1,02	1,03	1,03	1,04	1,05	1,06	1,07	1,08	1,09	1,12	1,14	1,17	1,20	1,23
30	1,01	1,02	1,02	1,03	1,04	1,05	1,06	1,07	1,08	1,09	1,11	1,13	1,15	1,18	1,21
40	1,01	1,01	1,02	1,03	1,03	1,04	1,05	1,06	1,07	1,08	1,09	1,11	1,13	1,15	1,18
50	1,01	1,01	1,02	1,03	1,03	1,04	1,05	1,05	1,06	1,07	1,08	1,10	1,12	1,14	1,16
60	1,01	1,01	1,02	1,02	1,03	1,04	1,04	1,05	1,06	1,06	1,08	1,09	1,11	1,12	1,14
70	1,01	1,01	1,02	1,02	1,03	1,03	1,04	1,05	1,05	1,06	1,07	1,09	1,10	1,12	1,13
80	1,00	1,01	1,02	1,02	1,03	1,03	1,04	1,04	1,05	1,05	1,07	1,08	1,09	1,11	1,12
100	1,00	1,01	1,01	1,02	1,02	1,03	1,03	1,04	1,04	1,05	1,06	1,07	1,08	1,10	1,11

L_λ selon G.6

Annexe I (informative) **Index des termes**

Tableau 81 Index alphabétique des termes définis au chapitre 1

Aucun changement, consulter SIA 261: 2020.

[1] Les valeurs du tableau ont été recalculées avec les formules de l'EN1991-2 Annexe D; certaines valeurs diffèrent ($L_\lambda \leq 10m, V \leq 80km/h$ entre -2% et +11%) de celles de la SIA 269/1, Annexe A

4 Exemples d'utilisation de la nouvelle méthode lambda

Ce chapitre présente un exemple de calcul qui montre l'application de la méthode d'équivalence de dommages (méthode lambda) actuelle et avec la mise à jour, en la comparant avec des simulations utilisant le trafic réel (cumulation des dommages). On montre aussi ici la vérification avec la limite de fatigue (décrite dans le paragraphe 2.3.1), afin de comparer les différentes vérifications possibles.

4.1 Trafic réel utilisé

On utilise ici deux trafics réels : la ligne RhB de Samedan-Pontresina de 2020 et la ligne MGB de Zermatt-Täsch-Visp de 2019.

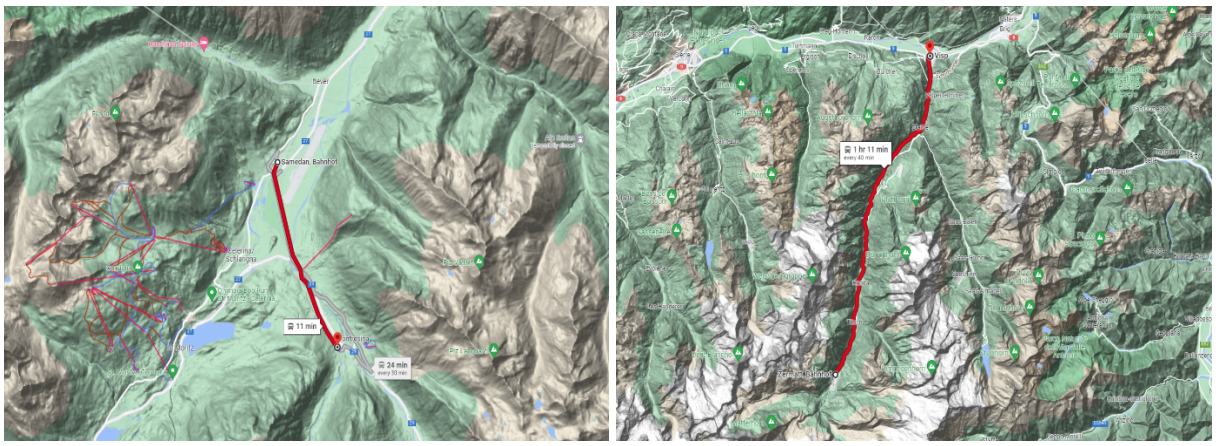


Figure 4.1 –Parcours des deux lignes à voie étroite utilisées dans le cas d'étude

Les deux lignes ont les caractéristiques suivantes :

- **RhB** : Q_{obs}=94,5 kN N_{obs}= 269'160 essieux/an V_{obs}= 2,26 Mio tonnes/an avec environ 46 trains/jour (78,9% Engadinpendel, 8,8% Bernina Express, 12,0% Güterzuge, 0,3% Bauzüge)
- **MGB** : Q_{obs}=107,8 kN, N_{obs}= 1'176'700 essieux/an, V_{obs}= 11,45 Mio tonnes/an avec environ 203 trains/jour (26,6% Shuttle 1, 26,6% Shuttle 2, 6,1% Regionalverkehr 1, 24,5% Regionalverkehr 2, 12,2% Regionalverkehr 3, 1,9% Glacier-Express, 2% Güterzug)

La vitesse maximale de roulement sur le pont pour l'étude de cas a été considérée égale à 60 km/h.

La charge maximale par essieu est de 160 kN, il est donc correct d'utiliser un modèle de charge de type 5.

4.2 Systèmes statiques, longueurs déterminantes L_λ et facteurs partiels

Afin de présenter plusieurs cas, nous allons étudier 2 systèmes statiques :

- une poutre simple de 80 m de portée (cas fictif), détail à vérifier en fatigue est à mi-portée. Il est soumis à des contraintes qui proviennent de la flexion de la poutre,
- une poutre continue sur 3 appuis, d'une longueur totale d'environ 89 m ; on prend ici un pont existant riveté typique du début du 20e siècle, deux détails à vérifier en fatigue :
  - sur un longeron (L006), donc soumis à des contraintes de flexion provenant principalement du passage des essieux
  - attache d'une barre du contreventement (SV002), soumis à des contraintes de traction provenant du comportement 3D de la structure lors du passage des trains

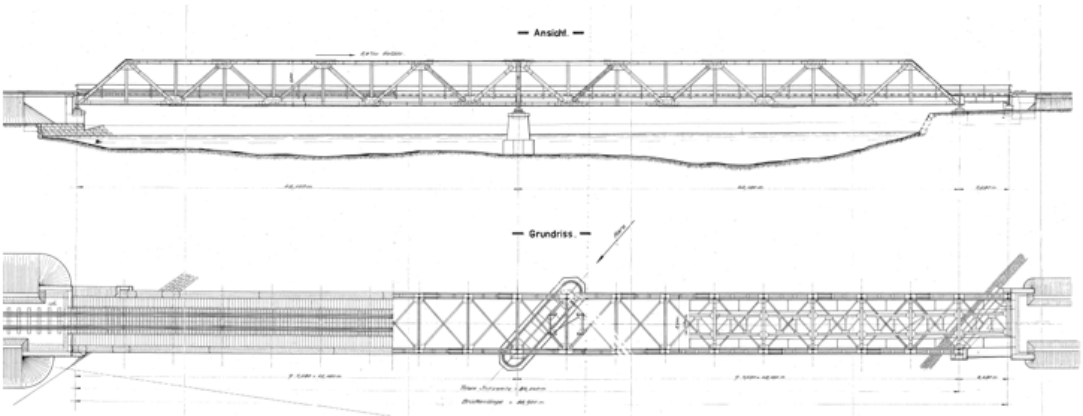
(pont biais).

Les valeurs des facteurs partiels sont pris égales à : côté effets d'action γ_{Ff} **= 1,00** et côté résistance γ_{Mf} **= 1,15** (correspond à un cas « moyen »).

Dans le cas de la poutre simple, la ligne d'influence du moment fléchissant en travée d'une poutre simple 1S-MM est représentée à la Figure 4.2. On a comme longueur déterminante la portée, L_λ= 80 m. On choisit pour pouvoir faire les calculs un module de section W_{el} = 1,0 m^3. Et la résistance du détail, exprimées à 2 Millions de cycles, est admise (cas fictif) égale à $\Delta\sigma_C$ = 80 N/mm^2.



Figure 4.2 – Poutre simple et sa ligne d'influence à mi-travée, L = 80 m



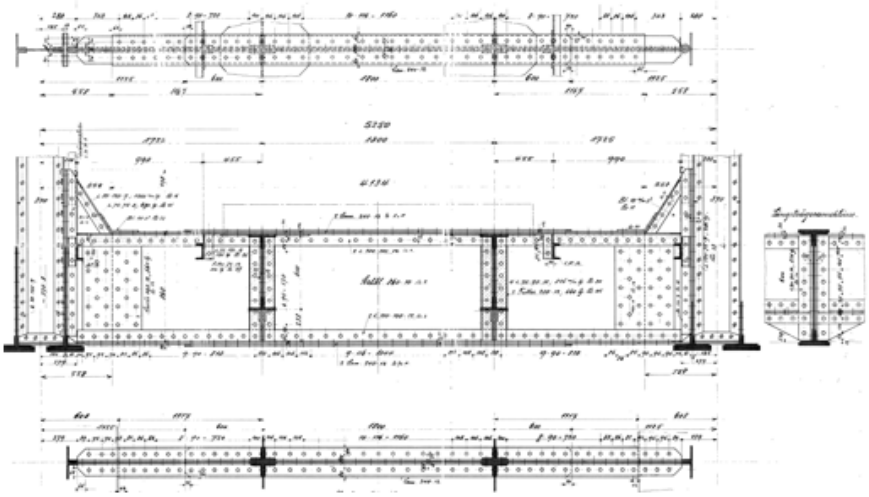


Figure 4.3 – Pont existant riveté, admis comme ayant été construit en 1915

Dans le cas du pont riveté, la Figure 4.3 montre l'ouvrage et la Figure 4.4 montre la position des deux détails du pont. On va faire circuler les trains à l'axe longitudinal du pont, ce qui correspond à une longueur $L_{,li}$ de 88,92 m. Pour chacun des deux détails étudiés, la longueur déterminante L_λ est déterminée directement à partir de la ligne d'influence de chacun des détails et ces sollicitations. Elles sont la plupart du temps différentes de la longueur du pont et nos deux cas ne peuvent pas vraiment être classés parmi ceux de l'article G.6 (voir également la section 2.5). Il faut donc procéder en analysant la forme de la ligne d'influence pour trouver le cycle maximal qui peut être généré en le comparer, par

référence ou analogie, avec des cas connus. Rappelons qu'il est préférable de sous-estimer la longueur déterminante L_λ car plus elle est petite, plus le calcul est conservateur. Les lignes d'influence ont ici été obtenues directement par éléments finis et elle sont représentés en σ/Q_i. Cela signifie qu'une charge unitaire de 1 kN en chaque point génère une contrainte exprimée en N/mm^2. Une ligne d'influence peut aussi être exprimée en kN/Q_i, ce qui signifie qu'une charge unitaire de 1 kN en chaque point génère un effort intérieur en kN, resp., kNm. Cet effort est ensuite divisé par l'aire, resp. le module de résistance W_{el}, de la section pour obtenir la contrainte en N/mm^2.

Dans le cas du détail L006, la ligne d'influence peut être assimilée à celle d'une poutre sur 4 appuis, flexion de la travée centrale. On prend donc comme longueur déterminante L_λ la longueur de la travée centrale. Dans le cas du détail SV002, la ligne d'influence n'est pas identifiable mais constituée essentiellement d'une « bosse », donc par analogie à une poutre simple (en flexion, cisaillement près d'un appui ou réaction d'appui), c'est cette longueur qui est utilisée.

Les résistances des détails, $\Delta\sigma_C$, exprimées à 2 Mio de cycles, valent selon la norme SIA 263 annexe E : 71 N/mm^2 pour le détail L006 et 80 N/mm^2 pour le détail SV002.

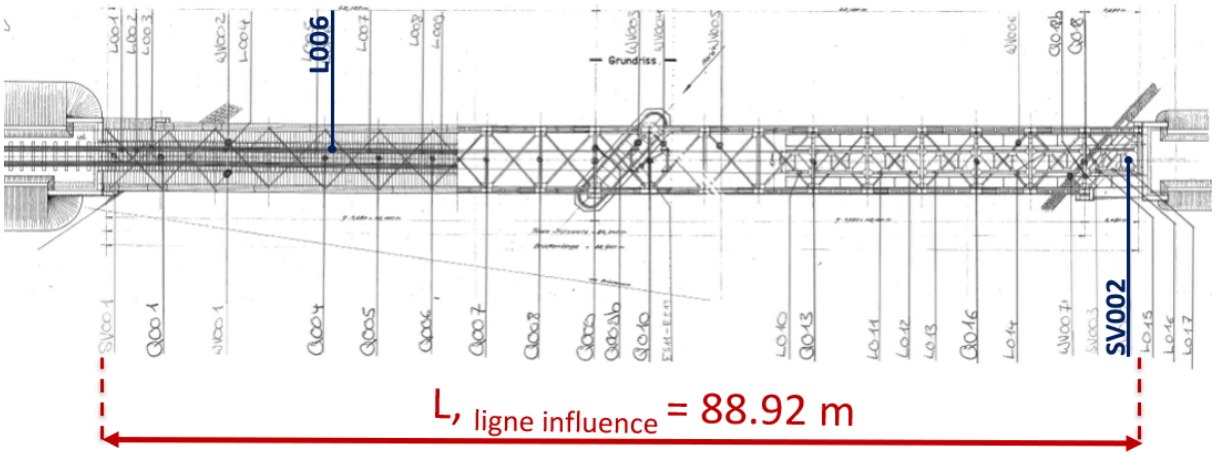
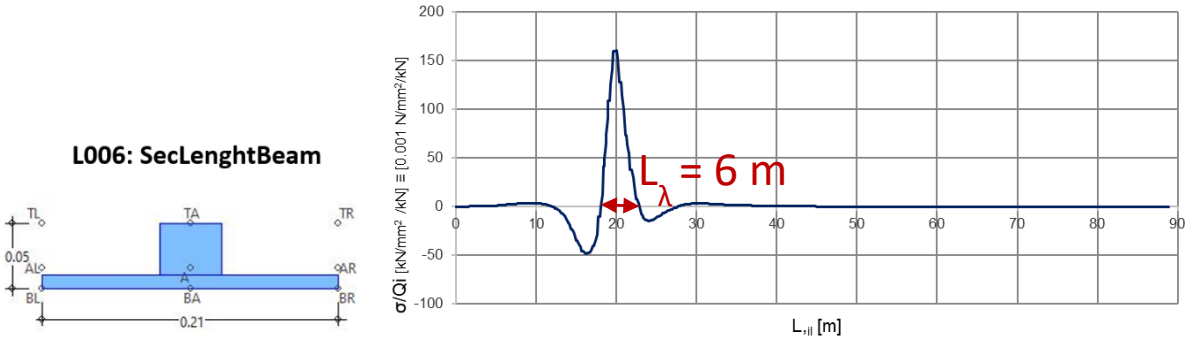


Figure 4.4 – Pont existant riveté, positionnement des détails étudiés



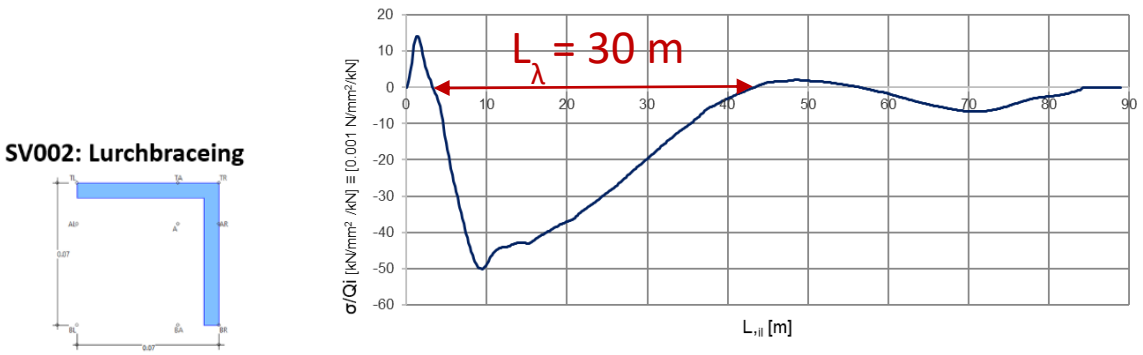


Figure 4.5 – Pont existant riveté, lignes d'influence pour chacun des deux détails étudiés

4.3 Résultats des différentes vérifications

4.3.1 Vérification avec la limite de fatigue (vie infinie)

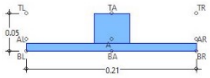
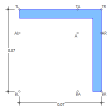
$$\gamma_{\mathrm{Ff}} \cdot \Delta\sigma_{\mathrm{i,max}} \leq \frac{\Delta\sigma_{\mathrm{D}}}{\gamma_{\mathrm{Mf}}}$$

La vérification à la fatigue avec la limite de fatigue est la vérification la plus conservatrice. Elle vérifie que le plus grand cycle $\Delta\sigma_{\mathrm{i,max}}$, généré à travers le modèle de charge 5, est inférieur à la limite de fatigue sous amplitude constante $\Delta\sigma_{\mathrm{D}}$, en assumant que la résistance du détail tend vers l'infini (cycles suffisamment bas).

Il faut noter que la valeur de la résistance du détail correspondant à la limite de fatigue sous amplitude constante est aussi réduite ultérieurement. La vérification utilise en effet la résistance $\Delta\sigma_{D,}$ qui correspond à $\Delta\sigma_C \cdot 0{,}74$ selon la figure 48 de la norme SIA 263.

L'autre particularité de cette vérification est qu'elle ne tient pas compte du trafic ferroviaire sur la voie. Une voie très peu chargée comme Samedan-Pontresina donne donc les mêmes résultats que la voie Zermatt-Täsch-Visp, puisque la vérification inclut uniquement le cycle maximal généré par le modèle de charge 5.

Tableau 4.1 –Résultats vérification avec la limite de fatigue

Détails	**RhB: $\Delta\sigma_{i,max}$ (LM5) [N/mm²]**	**MGB: $\Delta\sigma_{i,max}$ (LM5) [N/mm²]**	**$\Delta\sigma_D/\gamma_{Mf}$ [N/mm²]**
L006: SecLenghtBeam 	68,95 (n=0,66)		45,7
SV002: Lurchbraceing 	76,06 (n=0,68)		51,5
Poutre simple	44,54 (n=1,16)		51,5

Ces cycles maximaux $\Delta\sigma_{i,max}$, générés par le modèle de charge 5, ont été calculés en considérant le coefficient dynamique déterminé selon le tableau de notre proposition (voir section 3.2 , Annexe H (nouvelle)), pour une vitesse de 60 km/h ; ils valent respectivement :

- **Détail L006** : L_λ=6 m, ϕ_{fat} = 1,16 ;
- **Détail SV002** : L_λ=30 m, ϕ_{fat} = 1,05 ;
- **Poutre simple** : L_λ=80 m, ϕ_{fat} = 1,03.

Il faut noter que dans le cas d'une nouvelle structure, la norme SIA 261 §11.3.1 utilise un calcul différent.

La vérification avec la limite de fatigue satisfait la vérification de 1 détail sur 3.

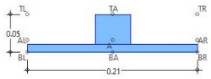
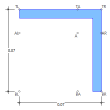
4.3.2 Vérification avec le cumul de dommages

$$\phi_{fat} \cdot \gamma_{\mathrm{Ff}} \cdot \Delta\sigma_{\mathrm{E},2} \leq \frac{\Delta\sigma_{\mathrm{C}}}{\gamma_{\mathrm{Mf}}}$$

Cette vérification est la plus détaillée et la plus réaliste de toutes celles que nous effectuons. Le calcul considère le trafic réel avec les différents types de trains, modélisé avec le volume de trafic réel. L'algorithme calcule ensuite l'historique des contraintes, l'histogramme correspondant des cycles et enfin la différence de contrainte équivalente correspondant à 2 Mio des cycles, en faisant le calcul avec une double pente m=3|5, ce qui correspond exactement aux catégories des détails de la norme SIA 263.

Le calcul a été fait pour une durée de vie de l'ouvrage de **100 ans** et pour **une seule voie**.

Tableau 4.2 –Résultats vérification avec le cumul de dommage

Détails	**RhB: $\Delta\sigma_{E2}$ [N/mm²]**	**MGB: $\Delta\sigma_{E2}$ [N/mm²]**	**$\Delta\sigma_C/\gamma_{Mf}$ [N/mm²]**
L006: SecLenghtBeam 	47,78 (n=1,29)	75,60 (n=0.82)	61,7
SV002: Lurchbraceing 	28,16 (n=2,47)	43,72 (n=1,59)	69,6
Poutre simple	15,06 (n=4,62)	19,29 (n=3,61)	69,6

Comme attendu, le calcul avec le trafic de Samedan-Pontresina est beaucoup plus favorable que le trafic de Zermatt-Täsch-Visp, ce trafic possédant un volume beaucoup plus bas et aussi un poids moyen par essieu inférieur.

On voit que la vérification du détail SV002 et de la poutre simple est pleinement satisfaite pour les deux types des trafics. Par contre, la vérification du L006 est satisfaite uniquement pour le trafic RhB.

Le coefficient dynamique a été indiqué dans la formule précédente. On rappelle que son application à chaque train réel ou dans un deuxième temps donne le même résultat uniquement lorsqu'il est le même pour tous les types des trains. Or lorsque la vitesse est limitée à 60 km/h, il est égal pour tous les trains.

En général, on peut appliquer un coefficient dynamique unique, car les trains ont pratiquement la même vitesse et le nombre très réduit de trains de marchandises qui circulent à une vitesse plus basse n'affecte pas les résultats. Appliquer une vitesse plus élevée à ces trains est également conservateur.

La vérification avec le cumul des dommages satisfait la vérification de 5 détails sur 6 (NB : comme on a 2 trafics, les vérifications par détail sont dédoublées).

4.3.3 Vérification avec l'équivalence des dommages, méthode actuelle

$$\phi_{fat} \cdot \gamma_{\mathrm{Ff}} \cdot \Delta\sigma_{\mathrm{E},2} = \phi_{fat} \cdot \gamma_{\mathrm{Ff}} \cdot \lambda \cdot \Delta\sigma(\mathrm{Q_{fat}}) \leq \frac{\Delta\sigma_{\mathrm{C}}}{\gamma_{\mathrm{Mf}}}$$

La vérification à la fatigue avec l'équivalence des dommages (ou méthode lambda) calcule la différence de contrainte équivalente correspondant à 2 Mio des cycles, utilisant le modèle de charge à la fatigue Q_{fat}, le modèle de charge 5 et en appliquant le facteur global lambda, composé de λ_1, λ_2, λ_3 et λ_4.

En utilisant un trafic de 100 ans et une seule voie, les coefficients partiels λ_3 et λ_4 valent tous les deux 1,00. Le coefficient partiel $\boldsymbol{\lambda_2}$ est égal à **1,00** pour le trafic RhB (2,25 Mio ton/an) et **1,12** pour le trafic MGB (11,50 Mio ton/an).

Le coefficient partiel λ_1 est calculé selon la figure 26 de la norme SIA 261 et il est différent pour le trafic RhB (46 trains par jour) et MGB (203 trains par jour):

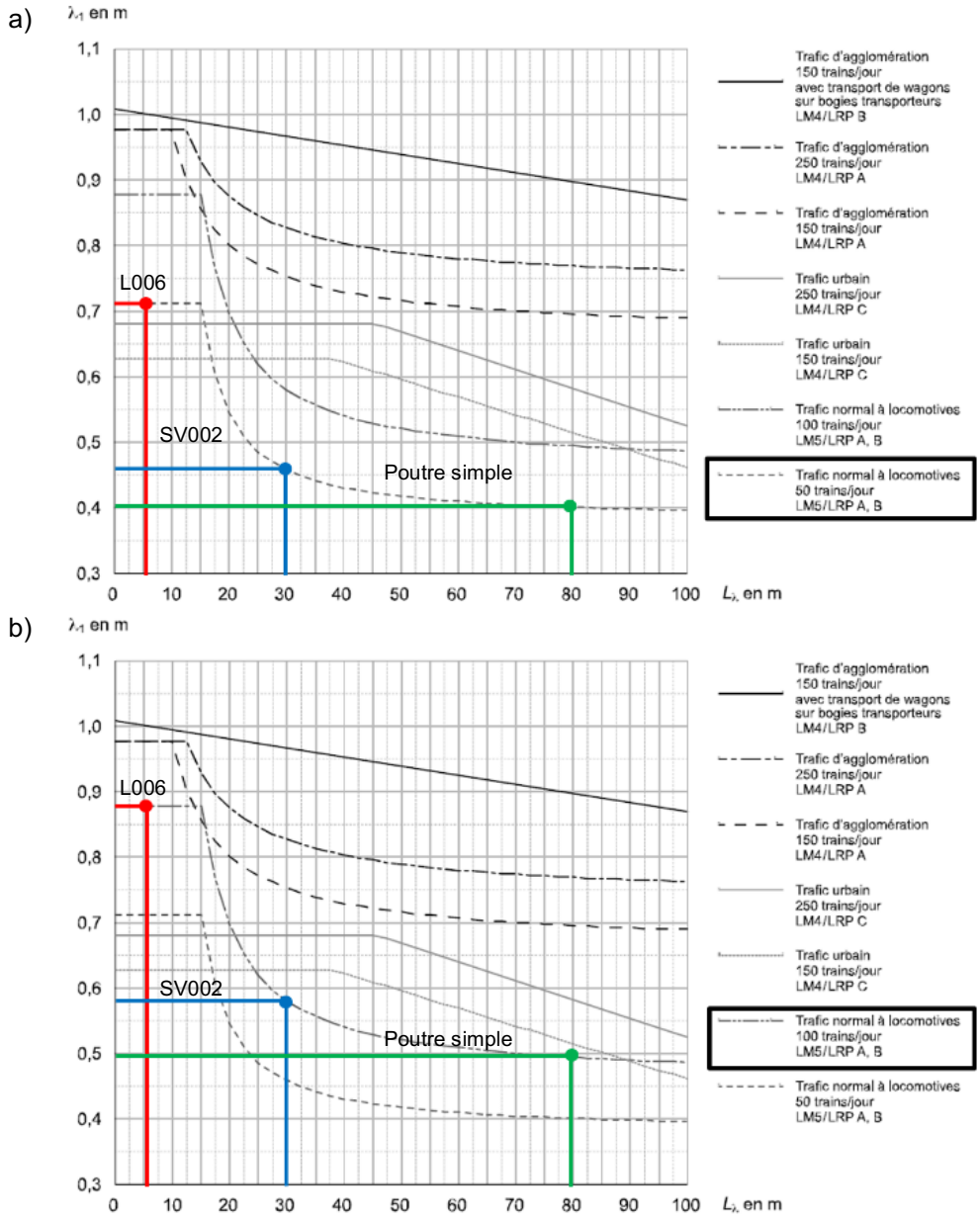


Figure 4.6 – Calcul du coefficient partiel λ_1, a) cas RhB, b) cas MGB

Dans la figure précédente, on montre sur chaque graphique le coefficient partiel des trois différents détails de ce cas d'étude en fonction de leur longueur L_λ.

L006

Dans la norme actuelle, la longueur L_λ n'existe pas, il s'agit de la longueur dynamique L_ϕ, qui conduit donc aux coefficients dynamiques suivants :

- **Détail L006** : L_λ=6 m, ϕ_{fat} = 1,46 ;
- **Détail SV002** : L_λ=30 m, ϕ_{fat} = 1,32 ;
- **Poutre simple** : L_λ=80 m, ϕ_{fat} = 1,00.

Il faut noter que ces coefficients sont plus élevés que lors des deux calculs précédents, parce que la norme actuelle utilise avec cette vérification seulement le calcul décrit dans le paragraphe 7.5 (§11.3.1 de la norme SIA 261).

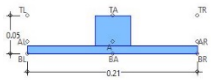
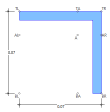
Le calcul avec la norme actuelle montre aussi la limite des catégories des trains définies dans les courbes. Il n'y a par exemple pas de courbe avec un modèle de charge 5 et un volume de 200 trains/jour, comme pour le trafic MGB. Le tableau 4.3 montre toutes les valeurs des coefficients utilisés dans le calcul.

Tableau 4.3 – Détail du calcul avec la méthode lambda actuelle

	ϕ_{fat} [-]	γ_{Ff} [-]	λ_1 [-]	λ_2 [-]	λ_3 [-]	λ_4 [-]	λ [-]	$\Delta\sigma(Q_{fat})$ [N/mm²]	$\phi_{fat}\cdot\gamma_{Ff}\cdot\lambda\cdot\Delta\sigma(Q_{fat})$ [N/mm²]
L006, RhB	1,46	1,00	0,72	1,00	1,00	1,00	0,72	59,4	62,49
L006, MGB			0,87	1,12	1,00	1,00	0,97		84,57
SV002, RhB	1,32		0,46	1,00	1,00	1,00	0,46	67,9	41,23
SV002, MGB			0,58	1,12	1,00	1,00	0,65		58,23
Poutre, RhB	1,00		0,40	1,00	1,00	1,00	0,40	43,2	17,30
Poutre, MGB			0,50	1,12	1,00	1,00	0,56		24,22

Les résultats finaux en appliquant tous les facteurs sont résumés dans le tableau 4.4, qui montre que la vérification avec l'équivalence des dommages actuels satisfait la vérification de 4 détails sur 6.

Tableau 4.4 – Résultats vérification avec la méthode lambda actuelle

Détails	**RhB: $\lambda\cdot\Delta\sigma(Q_{fat})$ [N/mm²]**	**MGB: $\lambda\cdot\Delta\sigma(Q_{fat})$ [N/mm²]**	**$\Delta\sigma_D/\gamma_{Mf}$ [N/mm²]**
L006: SecLenghtBeam 	62,49 (n=0,99)	84,57 (n=0,73)	61,7
SV002: Lurchbraceing 	41,23 (n=1,69)	58,23 (n=1,19)	69,6
Poutre simple	17,30 (n=4,02)	24,22 (n=2,87)	69,6

4.3.4 Vérification avec l'équivalence des dommages, méthode révisée

$$\phi_{fat}\cdot\gamma_{\mathrm{Ff}}\cdot\Delta\sigma_{\mathrm{E},2}=\phi_{fat}\cdot\gamma_{\mathrm{Ff}}\cdot\lambda\cdot\Delta\sigma(\mathrm{Q_{fat}})\leq\frac{\Delta\sigma_{\mathrm{C}}}{\gamma_{\mathrm{Mf}}}$$

La vérification reste la même, la seule différence est dans les valeurs des coefficients partiels λ_1 et λ_2, ainsi que dans le calcul du facteur dynamique ϕ_{fat}.

Le calcul du coefficient dynamique est aligné à la vérification avec la limite de fatigue pour la norme SIA 269/1 et avec le calcul du cumul du dommage, en utilisant donc le tableau 4 de l'annexe A de la norme SIA 269/1 (correspondant à l'annexe D de la norme EN 1991-2):

- **Détail L006** : L_λ=6 m, ϕ_{fat} = 1,16 ;
- **Détail SV002** : L_λ=6 m, ϕ_{fat} = 1,05 ;
- **Poutre simple** : L_λ=80 m, ϕ_{fat} = 1,03.

Le calcul du facteur partiel λ_1 est représenté dans la figure suivante :

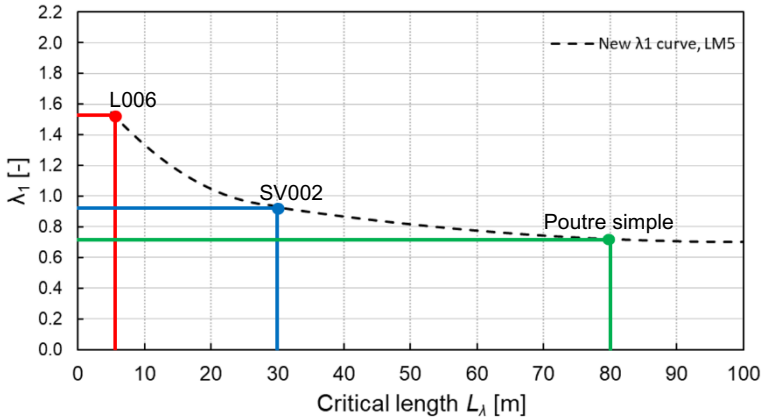


Figure 4.7 – Calcul du coefficient partiel λ_1

Vu que le coefficient partiel n'est pas dépendant du volume du trafic ou du nombre de trains par jour, comme décrits dans le paragraphe 10.1, ce coefficient dépend uniquement de la longueur déterminante L_λ et du modèle de charge (en ce cas LM5), et il est identique pour les deux types de trafic. Les différences de volume et de composition des trains entre le trafic RhB et MGB sont prises en compte par le facteur partiel λ_2. Le calcul selon les trois niveaux de calcul est le suivant, en partant du trafic RhB :

$$\lambda_2 = 1{,}00$$

$$\lambda_2 = \left(\frac{V_{obs}}{V_0}\right)^{\frac{1}{m}} = \left(\frac{2\,255\,354}{12\,000\,000}\right)^{\frac{1}{5}} = 0{,}72$$

$$\lambda_2 = \frac{Q_{obs}}{Q_0} \cdot \left(\frac{N_{obs}}{N_0}\right)^{\frac{1}{m}} = \frac{94{,}5}{120} \cdot \left(\frac{269\,160}{1\,000\,000}\right)^{\frac{1}{5}} = 0{,}61$$

Pour le calcul du trafic MGB :

$$\lambda_2 = 1{,}00$$

$$\lambda_2 = \left(\frac{V_{obs}}{V_0}\right)^{\frac{1}{m}} = \left(\frac{11\,453\,836}{12\,000\,000}\right)^{\frac{1}{5}} = 0{,}99$$

$$\lambda_2 = \frac{Q_{obs}}{Q_0} \cdot \left(\frac{N_{obs}}{N_0}\right)^{\frac{1}{m}} = \frac{107{,}8}{120} \cdot \left(\frac{1\,176\,736}{1\,000\,000}\right)^{\frac{1}{5}} = 0{,}93$$

Ce dernier calcul avec le trafic MGB est très proche de 1,00 car il représente une des compositions les plus critiques utilisées pour calculer la nouvelle courbe λ_1.

Pour le calcul final et les comparaisons suivantes entre les méthodes, on retient le niveau de calcul du facteur partiel λ_2 le plus détaillé.

Les deux coefficients partiels λ_3 et λ_4 sont égaux à 1,00 comme pour la méthode actuelle.

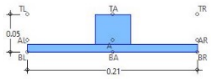
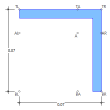
Le tableau 4.5 résume toutes les valeurs des coefficients utilisés dans le calcul.

Tableau 4.5 – Détail du calcul avec la méthode lambda mise à jour

	ϕ_{fat} [-]	γ_{Ff} [-]	λ_1 [-]	λ_2 [-]	λ_3 [-]	λ_4 [-]	λ [-]	$\Delta\sigma(Q_{fat})$ [N/mm²]	$\phi_{fat} \cdot \gamma_{Ff} \cdot \lambda \cdot \Delta\sigma(Q_{fat})$ [N/mm²]
L006, RhB	1,16	1,00	1,50	0,61	1,00	1,00	0,92	59,4	63,09
L006, MGB			1,50	0,93	1,00	1,00	1,40		96,19
SV002, RhB	1,12		0,93	0,61	1,00	1,00	0,57	67,9	43,15
SV002, MGB			0,93	0,93	1,00	1,00	0,86		65,78
Poutre, RhB	1,03		0,72	0,61	1,00	1,00	0,44	43,2	19,56
Poutre, MGB			0,72	0,93	1,00	1,00	0,67		29,83

Les résultats finaux en appliquant tous les facteurs sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau 4.6 – Résultats vérification avec la méthode lambda mise à jour

Détails	**RhB: $\lambda \cdot \Delta\sigma(Q_{fat})$ [N/mm²]**	**MGB: $\lambda \cdot \Delta\sigma(Q_{fat})$ [N/mm²]**	**$\Delta\sigma_D/\gamma_{Mf}$ [N/mm²]**
L006: SecLenghtBeam 	63,09 (n=0,98)	96,19 (n=0,64)	61,7
SV002: Lurchbraceing 	43,15 (n=1,61)	65,78 (n=1,06)	69,6
Poutre simple	19,56 (n=3,56)	29,83 (n=2,33)	69,6

La vérification avec l'équivalence des dommages mise à jour satisfait la vérification de 4 détails sur 6.

4.4 Conclusions

La mise à jour de la méthode lambda permet de simplifier le calcul et de donner plus de cohérence entre les normes, notamment pour les différents facteurs partiels lambda.

La nouvelle méthode est légèrement plus conservatrice, comme le montre le tableau suivant :

Tableau 4.7 – Comparaison entre la version révisée et la version actuelle : (révisée-actuelle)/actuelle en %

Détails	RhB: $\lambda \cdot \Delta\sigma(Q_{fat})$	MGB: $\lambda \cdot \Delta\sigma(Q_{fat})$
L006: SecLengthBeam	+ 1%	+ 14%
SV002: Lurchbraceing	+ 5%	+ 13%
Poutre simple	+ 13%	+ 23%

En effet, même si le calcul avec la version révisée est plus précis, les valeurs du facteur partiel λ_1 proviennent d'une courbe qui a été générée en combinant 54 lignes d'influences et 42 types de trafic (incluant le trafic futur et le plus défavorable). Il y a donc plus de cas critiques par rapport à la version actuelle de la méthode, où la courbe est générée avec 1-2 lignes d'influences et un seul type du trafic.

Il a été montré dans l'exemple que pour un détail d'une poutre simple de longueur 80 m, avec le trafic MGB Zermatt-Täsch-Visp de 2019, le facteur partiel $\boldsymbol{\lambda_1}$ est de **0,72**. Dans la figure suivante qui reprend une partie des 2'268 cas simulés, on remarque que pour ce trafic et cette ligne d'influence, le facteur λ_1 correspondant est plutôt de **0,44**. Mais comme la courbe λ_1 ne fait pas de distinction entre les types de trafic ou les lignes d'influence, seule la valeur plus élevée peut être utilisée.

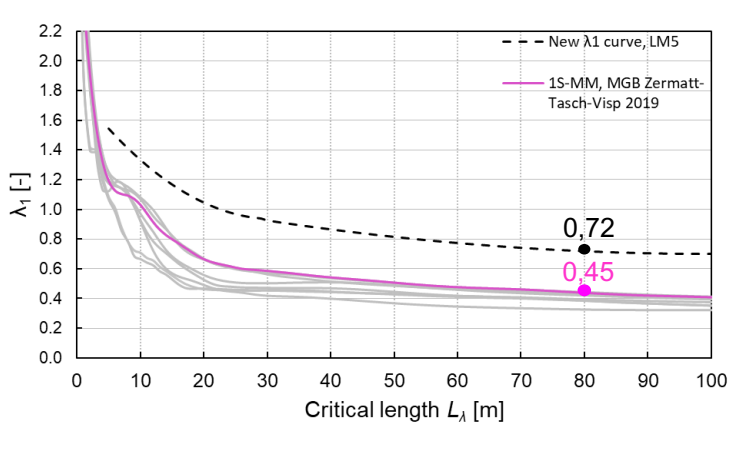


Figure 4.8 – Courbes λ_1 pour différentes lignes d'influence du trafic MGB Zermatt-Täsch-Visp 2019

Utiliser le trafic de la ligne MGB et la ligne d'influence exacte aurait permis de réduire la valeur $\Delta\sigma_{E,2}$ dans la vérification de 37%. La méthode lambda étant une méthode simplifiée, elle sert d'abord au classement entre les emplacements sur le pont où il n'y a pas de problème de fatigue et ceux potentiellement problématiques. En première approximation, ou lors d'un examen général selon la SIA 269, il est donc correct d'utiliser la borne supérieure du trafic suisse et l'ensemble des lignes d'influences les plus critiques.

Pour une analyse plus détaillée, pour les cas qui ne satisfont pas cette première vérification et en particulier lors d'un examen détaillé selon la SIA 269, il est recommandé d'utiliser la méthode de cumul de dommages. Le tableau suivant montre la réduction en pourcentage associée à l'utilisation de cette dernière, en comparant les valeurs des paragraphes 4.3.4 et 4.3.2.

Tableau 4.8 – Réduction contrainte équivalente utilisant le cumul de dommages comparé avec la méthode lambda

Détails	RhB: $\lambda \cdot \Delta\sigma(Q_{fat})$	MGB: $\lambda \cdot \Delta\sigma(Q_{fat})$
L006: SecLenghtBeam	-24%	-21%
SV002: Lurchbraceing	-35%	-34%
Poutre simple	-23%	-36%

En moyenne, la méthode de cumul de dommages permet de réduire la différence de contrainte équivalente $\Delta\sigma_{E,2}$ à satisfaire d'environ 30%. Il est donc clair que dans le cas où la vérification n'est pas satisfaite, il est intéressant d'effectuer ce deuxième calcul et cette vérification.

La méthode de cumul des dommages est aussi recommandée dans le cas d'un trafic mixte (ferroviaire standard et ferroviaire à voie étroite); utiliser le trafic le plus critique peut en effet être trop conservateur.

On rappelle aussi que dans le cas où cette dernière vérification n'est pas satisfaite, il y a toujours la possibilité de monitorer la structure, i.e., d'effectuer des mesures pour avoir des historiques de contrainte aux emplacements problématiques, ceci afin de raffiner la vérification par cumul des dommages et avant de proposer des renforcements, voire une démolition/renouvellement. Car on remarque qu'en général les lignes d'influence et contraintes obtenues avec un modèle aux éléments finis sont très conservatrices par rapport aux contraintes réelles monitorées dans des éléments de la structure.

PARTIE II

5 Développement des algorithmes

La nécessité de développer des algorithmes spécifiques pour effectuer le calcul se justifie par la volonté d'augmenter considérablement le nombre des simulations par rapport aux simulations précédentes. Grâce à des algorithmes spécifiques, il est possible d'étendre le nombre de lignes d'influence (type et longueur) utilisées pour définir les courbes λ_1 de 60 à plusieurs milliers. Un autre objectif est d'étudier la sensibilité de chaque paramètre et permettre ainsi une analyse claire de leurs effets.

5.1 Fonctionnement de l'algorithme

Les nouveaux algorithmes possèdent deux options de calcul : la première consiste à calculer la résistance $\Delta\sigma_{E2}$ nécessaire pour obtenir un dommage égal à 1,00 à la fin de la durée de vie théorique du détail ; la seconde consiste à calculer le dommage pour une catégorie de détail spécifiée $\Delta\sigma_C$ à la fin d'une durée de vie théorique définie.

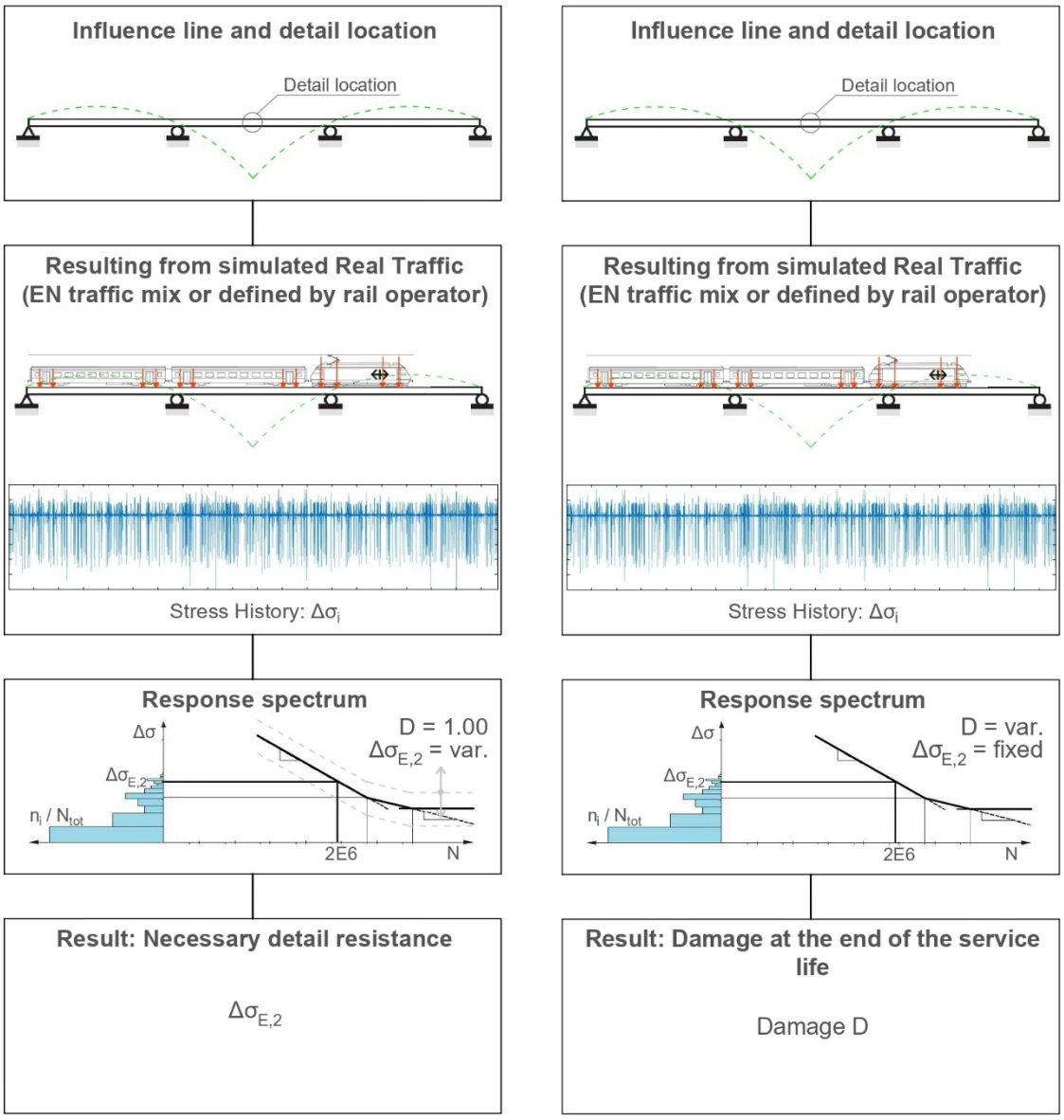


Figure 5.1 – Étapes de l'algorithme permettant d'obtenir soit la catégorie de détail nécessaire pour atteindre un dommage égal à 1,00 à la fin de la durée de vie théorique (à gauche), soit de calculer le dommage pour une catégorie de détail spécifiée (à droite).

Dans le premier cas, la boucle itérative de l'algorithme recherche un dommage D = 1,00. Pour cela, la position de la courbe de résistance à la fatigue (ou courbe S-N) est déplacée verticalement à chaque itération jusqu'à ce que l'équivalence, c'est-à-dire D = 1,00 dans la tolérance fixée, soit atteinte.

Dans le second cas, on détermine si le dommage accumulé est supérieur ou inférieur à D = 1,00 pour une courbe de résistance à la fatigue fixée qui correspond à la catégorie du détail étudié.

5.2 Méthode pour obtenir λ_1

Le calcul de la résistance $\Delta\sigma_{E2}$ nécessaire pour obtenir un dommage égal à 1,00 à la fin de la durée de vie théorique (voir paragraphe précédent), combiné avec le calcul de la différence de contraintes de référence générée par le modèle de charge de fatigue $\Delta\sigma(Q_{fat})$, permet de calculer le facteur λ_1, c'est-à-dire le rapport entre ces deux différences de contraintes.

La Figure 5.2 représente synthétiquement les étapes de l'algorithme pour le calcul de λ_1 :

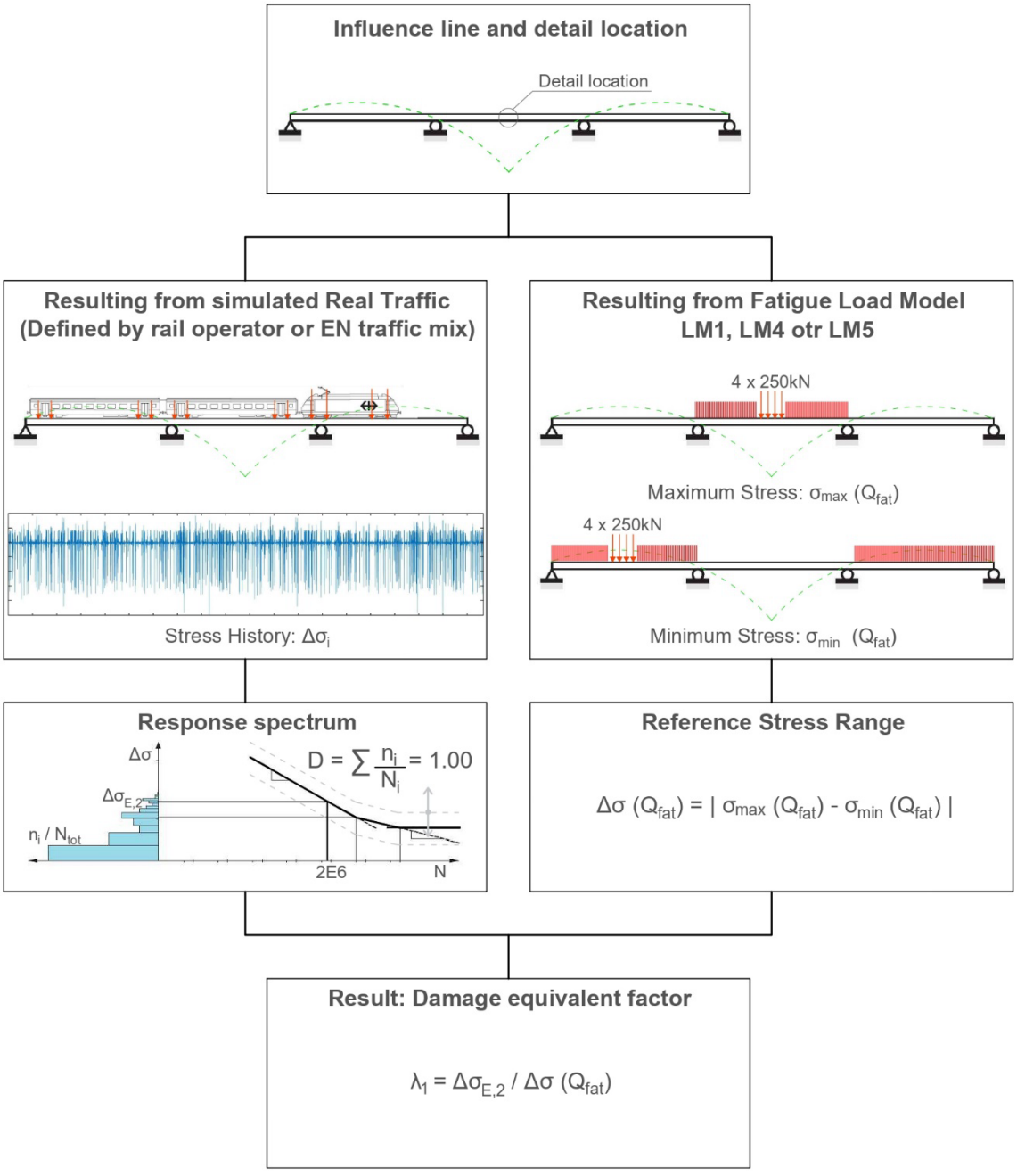


Figure 5.2 – Étapes de l'algorithme pour calculer le facteur λ_1 (adapté de [28])

Cette procédure fournit la différence de contrainte équivalent $\Delta\sigma_{E2}$ obtenue à partir du modèle de trafic réel simulé avec les géométries des trains et la configuration des wagons fournies par les opérateurs ferroviaires, et le modèle de charge de fatigue sélectionné (LM1, LM4 ou LM5) pour une ligne d'influence d'un système statique et d'un détail défini.

Le modèle de trafic réel donne d'abord un historique des cycles, calcule ensuite les cycles et leur amplitude puis donne un histogramme des contraintes. La courbe de résistance à la fatigue à deux pentes (m=3/5) est déplacée verticalement jusqu'à ce que le niveau de la courbe auquel le dommage D = 1,00 soit atteint, en supposant l'accumulation linéaire (Palmgren-Miner) des dommages (c'est-à-dire avec une défaillance si le dommage est égal à 1,00). Une fois que la position de la courbe de résistance à la fatigue est fixée, il est possible d'obtenir la différence de contraintes équivalentes $\Delta\sigma_{E2}$ qui correspond au niveau de contrainte pour N = 2 millions de cycles.

En parallèle, l'algorithme calcule les contraintes générées par le modèle de charge de fatigue placé aux positions extrêmes pour obtenir des valeurs minimales et maximales. La différence absolue entre ces deux valeurs constitue la différence de contraintes de référence $\Delta\sigma(Q_{fat})$. Une fois que la différence de contraintes équivalentes $\Delta\sigma_{E2}$ et la différence de contraintes de référence $\Delta\sigma(Q_{fat})$ sont obtenues, il est possible de calculer le facteur d'équivalence des dommages λ_1 , qui est le rapport entre les deux valeurs. Cette procédure a été appliquée pour chaque système statique. L'objectif principal du développement des algorithmes est de le faire automatiquement pour les différentes portées et différents systèmes statiques afin d'obtenir l'ensemble des valeurs λ_1.

5.3 L'algorithme du rainflow

Le développement de l'algorithme commence par les algorithmes de base fournis par Maddah [3], qui a adapté au trafic routier l'algorithme de comptage des cycles basé sur le rainflow qui est fréquemment utilisé (il fait maintenant partie de l'EN1990 : Annexe F (informative) Rainflow and reservoir counting methods for the determination of stress ranges due to fatigue). Ce dernier est basé sur un algorithme de comptage de cycle du rainflow développé par A. Nieslony [7] et rendu compatible pour être utilisé dans l'environnement MATLAB®. La fonction principale a été traduite de Turbo Pascal en langage C et compilée dans la fonction MEX. Le code de l'algorithme rainflow a été écrit selon la norme ASTM [8] et optimisé par rapport à la vitesse de calcul.

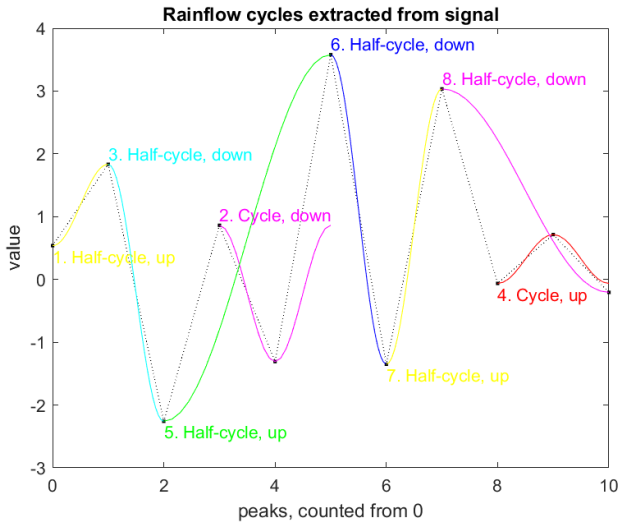


Figure 5.3 – Exemple de calcul des cycles selon la méthode rainflow

L'algorithme de comptage des cycles du rainflow est largement utilisé pour le contrôle ou l'évaluation de la durée de vie en fatigue des composants ou des structures de machines soumises à des charges

d'amplitude variable. En général, l'algorithme extrait les cycles des historiques de charge, de contrainte ou de déformation obtenus par mesure ou simulation. Le résultat du comptage est l'obtention de plusieurs cycles et demi-cycles avec différentes valeurs moyennes. Avec l'hypothèse de cumul linéaire des dommages de fatigue, comme la règle de Miner, l'avantage est que l'algorithme donne la possibilité de calculer la durée de vie en fatigue attendue dans des conditions de chargement aléatoires d'une manière efficace.

Au final, l'algorithme développé par l'EPFL permet de calculer le cumul des dommages en conformité avec le paragraphe 4.7.4 de la SIA 263 et de la norme EN 1993-1-9. L'algorithme est également en accord avec le document "Dokumentation D-076" [4] où un comptage de cycles rainflow a été utilisé dans la procédure pour développer les courbes lambda des normes SIA actuelles.

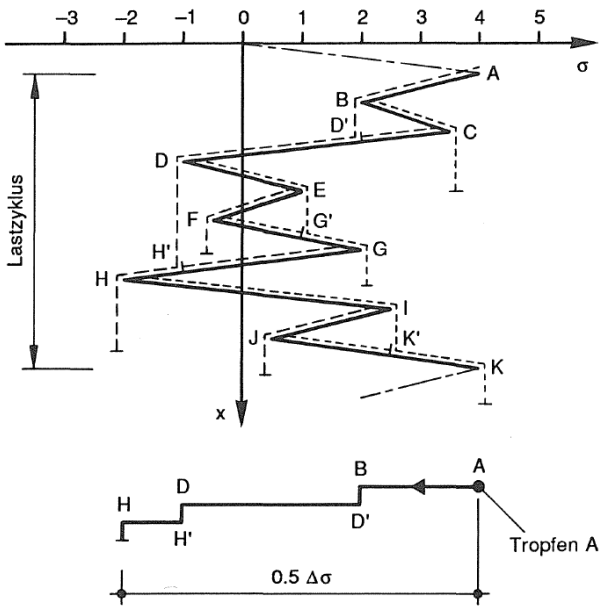


Figure 5.4 – Principe de comptage des cycles rainflow (extrait de [4]).

5.4 Lignes d'influence

Pour mettre à jour les valeurs λ de la norme SIA 261, des simulations ont été réalisées, couvrant suffisamment de configurations en variant le positionnement du détail et la longueur de la travée du pont. Il a été nécessaire d'obtenir la ligne d'influence pour chacune de ces configurations. La procédure suivante a été utilisé :

- Les lignes d'influence de toutes les configurations et positionnement des détails ont été obtenues avec un logiciel à éléments finis FEM (dans ce cas Cubus Statik 8) ;
- Tous les cas ont été catalogués et normalisés dans une feuille Excel ;
- Le code MATLAB développé est capable de lire les lignes d'influence normalisées d'Excel, de les remettre à l'échelle en fonction de la longueur de la portée et de créer une fonction d'interpolation linéaire pour calculer la différence de contraintes équivalentes $\Delta\sigma_{E2}$ et la différence de contraintes de référence $\Delta\sigma(Q_{fat})$.

Cette procédure a été réalisée pour sept types de systèmes statiques (illustrés dans la Figure 5.5) et divers types de contraintes et de positionnement des détails qui sont la combinaison des options suivantes :

- Moment de flexion, cisaillement et réactions ;
- Mi-portée, appuis, sections intermédiaires ;
- Poutre simple biarticulée (1S), poutre simple avec une articulation et un encastrement (1D), poutre bi-encastrée (1E), poutre continue sur 2 travées (2S), sur 2 travées avec une portée latérale égale à la moitié de la portée principale (2SH), poutre continue sur 3 travées (3S), sur 3 travées avec les portées latérales égales à la moitié de la portée principale (3SH).

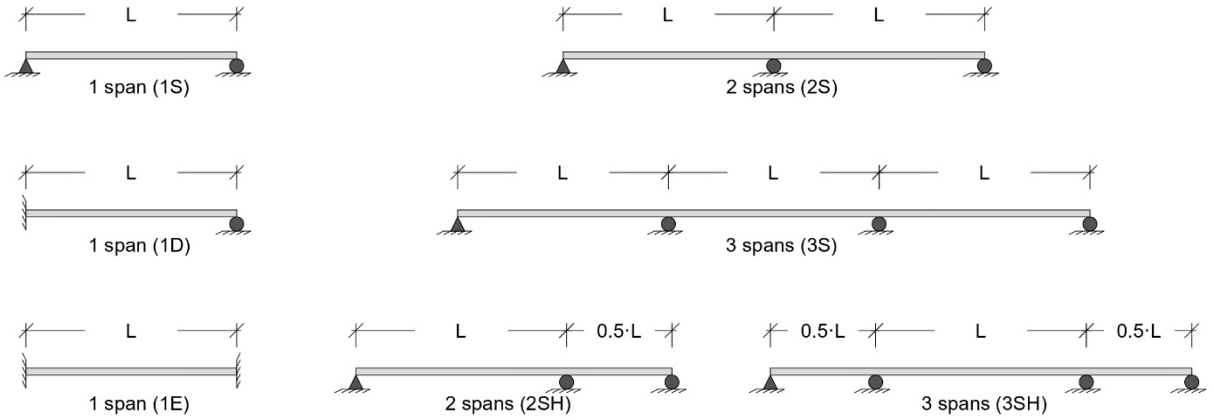


Figure 5.5 – Les différents systèmes statiques considérés dans les simulations.

Le choix d'utiliser des longueurs de travées latérales égales à la travée centrale ou à la moitié de celle-ci vient de l'idée de modéliser les deux cas extrêmes pour cette configuration.

Le nombre total de types de lignes d'influence est de **54** et ils sont présentés dans le Tableau 5.1. Toutes les lignes d'influence ne tiennent pas compte de la redistribution des contraintes due à la fissuration du béton sur les appuis centraux, car l'inertie des sections est constante le long du système statique.

Tableau 5.1 – Les différents types de lignes d'influence avec leurs acronymes

Influence line	1S	1D	1E	2S	3S	2SH	3SH
Midspan M	1S-MM	1D-MM	1S-MM	2S-MM	3S-MM	2SH-MM	3SH-MM
Midspan V	1S-MV	1D-MV	1S-MV	2S-MV	3S-MV	2SH-MV	3SH-MV
Intermediate M	1S-IM	-	-	2S-IM	3S-IM	2SH-IM	3SH-IM
Intermediate V	1S-IV	-	-	2S-IV	3S-IV	2SH-IV	3SH-IV
Support M	-	-	-	2S-SM	3S-SM	2SH-SM	3SH-SM
Support V	1S-SV	1D-SV	-	2S-SV	3S-SV	2SH-SV	3SH-SV
Lateral Midspan M	-	-	-	-	3S-LM	2SH-LM	3SH-LM
Lateral Midspan V	-	-	-	-	3S-LV	2SH-LV	3SH-LV
Fixed support M	-	1D-EM	1E-EM	-	-	-	-
Fixed support V	-	1D-EV	1E-EV	-	-	-	-
Central Reaction	-	-	-	2S-CR	3S-CR	2SH-CR	3SH-CR
Lateral Reaction	1S-LR	-	-	2S-LR	3S-LR	2SH-LR	3SH-LR

Le Tableau précédent comprend 53 types de lignes d'influence, le 54ème est un cas spécial appelé 2SX-SM, utilisé pour étudier en détail le cas où les travées ne sont pas exactement égales comme dans le cas 2S-SM mais où la deuxième travée a une longueur égale aux 4/5 de l'autre travée. Ce cas spécial a été étudié parce que le cas 2S-SM était critique pour les ponts routiers et nécessitait un critère spécifique pour la définition de la longueur déterminante L_λ. Dans le cas des ponts ferroviaires, il a été constaté que cela ne représentait pas un cas critique.

Les 54 types de lignes d'influence ont été étudiés avec différentes longueurs de portée, allant de 2 m à 1'000 m (les portées > 100 m ne représentent pas des cas réels mais sont utiles pour l'analyse de sensibilité sur les paramètres) et avec différents types de trafic, générant un total de plus de 93'000 points pour le facteur λ_1, un nombre important comparé aux 60 points utilisés pour générer les courbes des normes actuelles.

L'ensemble de ces lignes d'influences permet d'avoir une description à la fois plus précise et en sécurité qui couvre aussi le comportement des lignes d'influence les plus critiques et particulières. Dans le cas d'un calcul en trois dimensions, la contribution des autres effets doit être considérée, comme la réduction des pics dû à l'épaisseur des dalles, la rigidité transversale, la présence de la traverse et du ballast.

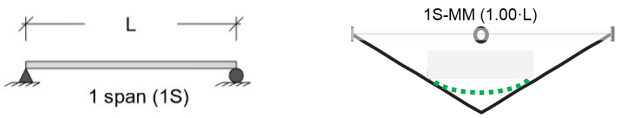


Figure 5.6 – Réduction des contraintes (en vert) dû à la répartition de toute charge concentrée grâce à la dalle épaisse et au ballast.

Dans la figure suivante, on voit l'exemple d'un ouvrage en béton à deux travées avec des poutres de bord qui rigidifient la structure et réduisent les valeurs de la ligne d'influence par rapport au cas simplifié repris de l'annexe C (représenté en rouge).

L'ensemble des lignes d'influence, avec la position détaillée et les règles de détermination de la longueur déterminante L_λ correspondante, est détaillé dans l'annexe C.

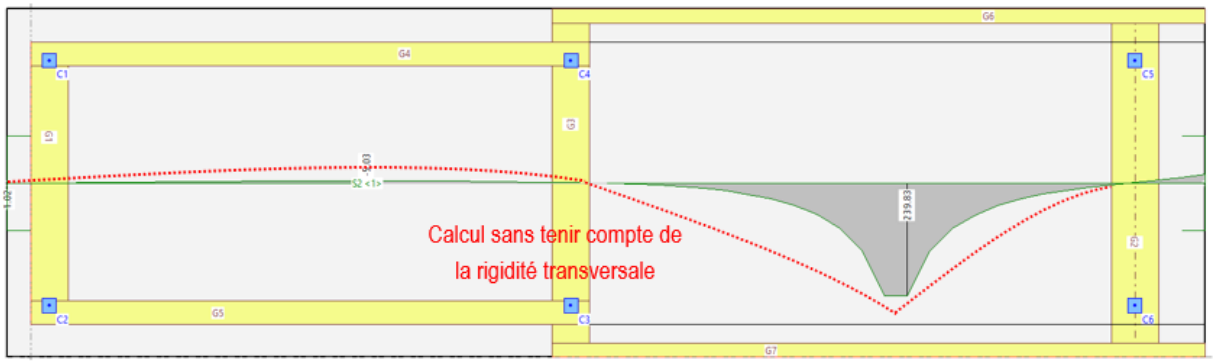


Figure 5.7 – Réduction des contraintes dû à la répartition transversale de la charge.

6 Facteur d'amplification dynamique (DAF)

L'application et la valeur d'un facteur dynamique a toujours été l'objet de discussions, voir par exemple [4][15][25]. Dans le cas des ponts ferroviaires, la norme n'est pas cohérente entre les différents types de vérifications. Il y a en effet deux procédures possibles pour la détermination du facteur dynamique. La première est décrite dans le paragraphe 11.3.1 de la SIA 261 (ou paragraphe 8.4.5 de l'EN 1991-2 : 2023; § 6.4.5 de la version de 2003) et concerne des voies bien entretenues. Cette procédure correspond à celle utilisée pour l'état limite ultime et ne considère pas la vitesse des trains. La deuxième est définie dans l'annexe D de la norme EN 1991-2 (Annex D : Basis for the fatigue assessment of railway structures. § D.3 Train types for fatigue), et la norme SIA 261 y fait référence dans le paragraphe 11.4.1.2. Cette procédure pour la détermination du facteur dynamique est spécifique à l'état limite fatigue, il est fonction de la vitesse des trains.

Dans le Tableau 6.1, différentes normes ont été comparées à l'aide de trois couleurs, où le vert correspond au facteur dynamique le moins conservateur (en sécurité et plus proche du cas réel) et le rouge au plus conservateur. Les combinaisons avec la même couleur ont le même facteur dynamique.

Tableau 6.1– Comparaison des différentes procédures de calcul du facteur d'amplification dynamique

Calcul du facteur dynamique	Vérification avec la limite de fatigue	Vérification avec le cumul des dommages	Vérification avec la méthode d'équivalence des dommages (méthode λ)
SIA 261, voie standard	§11.3.1 SIA 261 ≡ §6.4.5 EN 1991-2 pour voies bien entretenues	EN 1991-2, Annexe D selon SIA 261 11.4.1.2	§11.3.1 SIA 261 ≡ §6.4.5 EN 1991-2 pour voies bien entretenues
SIA 261, voie étroite	§11.3.1 SIA 261 ≡ §6.4.5 EN 1991-2 pour voies bien entretenues	EN 1991-2, Annexe D selon SIA 261 11.4.1.2	§11.3.1 SIA 261 ≡ §6.4.5 EN 1991-2 pour voies bien entretenues
SIA 269/1, voie standard	§11.3.1 SIA 261 ≡ §6.4.5 EN 1991-2 pour voies bien entretenues	EN 1991-2, Annexe D selon SIA 261 11.4.1.2	§11.3.1 SIA 261 ≡ §6.4.5 EN 1991-2 pour voies bien entretenues
SIA 269/1, voie étroite	Tab. 4, Annexe A, SIA 269/1 ≡ EN 1991-2, Annexe D	EN 1991-2, Annexe D selon SIA 261 11.4.1.2	§11.3.1 SIA 261 ≡ §6.4.5 EN 1991-2 pour voies bien entretenues
EN 1993-2, voie standard	§6.4.5 EN 1991-2 pour voies bien entretenues ou maintenance standard	EN 1991-2, Annexe D	§6.4.5 EN 1991-2 pour voies bien entretenues ou maintenance standard

Les trois normes SIA 261, SIA 269/1 et EN 1991-2 utilisent un facteur dynamique différent pour le modèle de charge pour la vérification avec la méthode d'équivalence des dommages (méthode lambda) et celui à utiliser dans la vérification avec le cumul des dommages. Comme la méthode lambda est liée à cette dernière, les deux facteurs dynamiques devraient pourtant correspondre.

Il y a deux explications possibles pour justifier cette incohérence : la première est qu'un coefficient de correction représenté par le rapport des deux facteurs dynamiques différents a été appliqué aux courbes λ_1 ; la seconde est que le facteur dynamique n'a pas été pris en compte dans les simulations et que l'application du facteur dynamique sur les modèles de charge représente une marge de sécurité supplémentaire qui rend la vérification plus conservatrice. Les simulations de l'EPFL ont montré qu'une correction n'a pas été appliquée, car les simulations pour le trafic ferroviaire à voie normale correspondent parfaitement aux courbes actuelles sans l'application d'aucun facteur de correction. L'EN

1993-2 et la SIA 261 présentent les mêmes courbes λ_1 pour le trafic à voie normale même si elles donnent une méthode différente pour calculer le facteur dynamique, ce qui vient confirmer cette hypothèse.

La norme EN 1991-2 introduit une troisième façon de calculer le facteur dynamique dans son Annexe C "Facteurs dynamiques 1+φ pour les trains réels". Elle représente la limite supérieure de ce facteur dans les situations réelles compte tenu de la vitesse des trains.

Des études sur le comportement de ce facteur ont été réalisées par l'EPFL pour chacune des 42 lignes de trafic ferroviaire modélisées. Le travail consiste tout d'abord à prendre comme référence le facteur dynamique calculé avec l'annexe D de l'EN 1991-2, conformément aux trois normes (considérant celle-ci comme la limite inférieure du facteur dynamique, spécifique pour la vérification de la fatigue). Le facteur dynamique est calculé comme une valeur moyenne en considérant le pourcentage de chaque type de train, la vitesse maximale correspondante et le poids moyen par essieu (calculé avec une pondération qui considère m=5).

Dans une deuxième phase, ces valeurs sont comparées aux valeurs obtenues avec le paragraphe 11.3.1 de la norme SIA 261 (utilisant Φ) et l'annexe C de EN 1991-2 (utilisant 1+φ). Enfin, les résultats sont présentés dans la Figure 6.1 pour 4 lignes de trafic ferroviaire différentes, exprimés en pourcentages par rapport aux valeurs données dans l'annexe D de l'EN 1991-2 (valeur de référence).

DAF_{norme}/DAF_{ref}

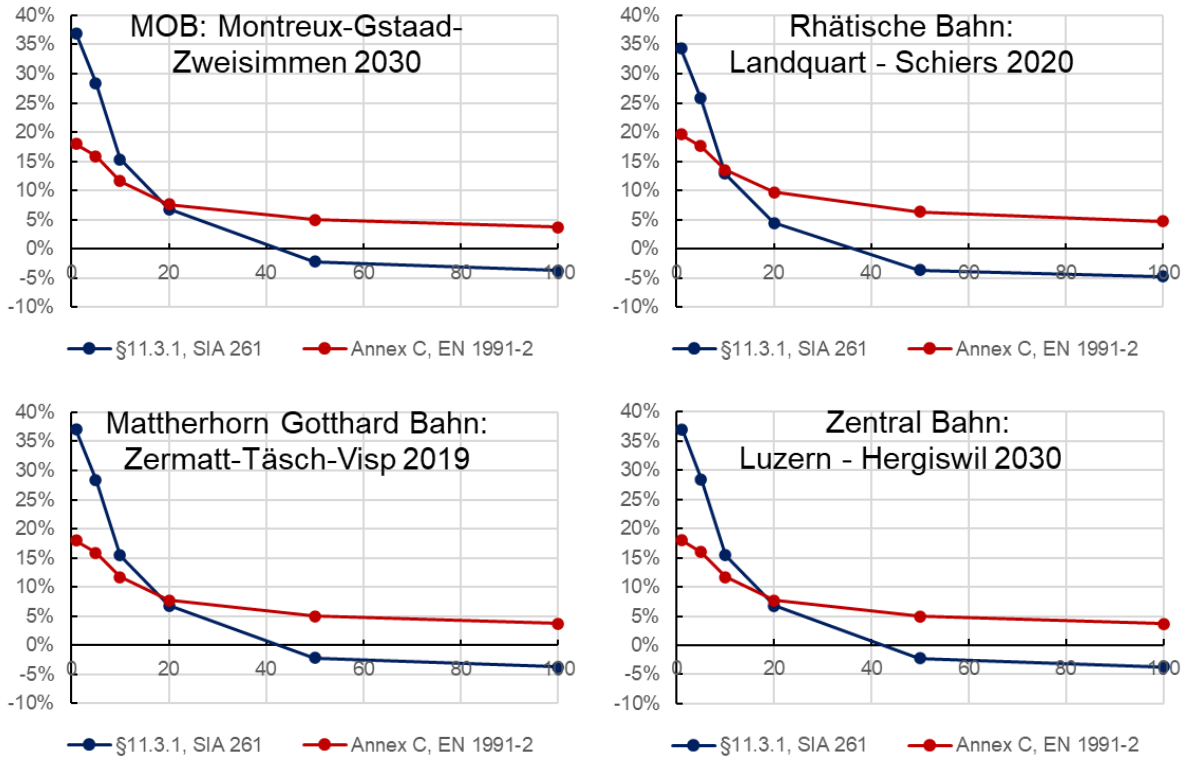


Figure 6.1 – Comparaisons des facteurs dynamiques pour 4 lignes de trafic ferroviaire différentes et des portées jusqu'à 100 m, exprimées en valeurs relatives par rapport à celles de l'annexe D de l'EN 1991-2 (DAF_{norme}/DAF_{ref})

La Figure 6.1 montre en bleu la comparaison avec le paragraphe 11.3.1 de la SIA 261 et en rouge la comparaison avec l'annexe C de l'EN 1991-2. Même si le type de trains, les configurations d'essieux et les vitesses sont différents entre les 4 lignes montrées comme exemple, varient entre 80 et 100 km/h (la vitesse n'a qu'un impact marginal sur la tendance des courbes), la tendance des courbes est similaire. La norme SIA surestime le facteur dynamique pour les courtes portées de 30 à 40%, alors

qu'elle le sous-estime d'environ 5% pour les longues portées. L'application de l'annexe C de l'EN 1991-2 montre une meilleure correspondance, tout en surestimant le facteur dynamique de 5 à 15%. Cela correspond aux affirmations du Prof. E. Brühwiler (e-mail du 17 Janvier 2020, sujet : Coefficient dynamique pour charges ferroviaires): "Les facteurs appelés « coefficients dynamiques » dans les normes n'ont pas de justification scientifique, remontent au milieu du siècle passé et sont démodés. Ils devraient être supprimés depuis longtemps, car ils augmentent inutilement et de manière importante les coûts des ponts ferroviaires et routiers (90% des ponts ont une portée courte !)".

La proposition actuelle de l'EPFL n'est pas d'aller aussi loin, mais d'uniformiser la vérification et de permettre l'utilisation de l'annexe D pour les vérifications à la fatigue du trafic ferroviaire existant à voie étroite. Cette nouvelle approche permettra d'être moins conservateur pour les portées inférieures à 20 m et plus conservateur pour les longues portées, en représentant au mieux des connaissances actuelles l'effet dynamique du trafic sur une structure.

Ci-dessous les extraits de l'EN 1991-2, Annexe D (mis sous forme du Tableau 4 pour ELU type 4 fatigue dans l'Annexe A, SIA 269/1) et de l'EN 1991-2, Annexe C (mis sous forme du Tableau 3 pour ELU type 2 et ELS dans l'Annexe A, SIA 269/1) :

Extraits annexe D de EN 1991-2: 2023 (Basis for the fatigue assessment of railway structures)

(1) The dynamic factors Φ_2 and Φ_3 which are applied to the static Load Model 71 and SW/0 and SW/2, when clause 6.4.5 applies, represent the extreme loading case to be taken into account for detailing bridge members. These factors would be unduly onerous if they were applied to the Real Trains used for making an assessment of fatigue damage.

(2) To take account of the average effect over the assumed 100 years life of the structure, the dynamic enhancement for each Real Train may be reduced to:

$$1 + \tfrac{1}{2}(\varphi' + \tfrac{1}{2}\varphi'') \qquad \text{(D.1)}$$

where φ' and φ'' are defined below in equations (D.2) and (D.5).

(3) Equations (D.2) and (D.5) are simplified forms of equations (C.3) and (C.6) which are sufficiently accurate for the purpose of calculating fatigue damage and are valid for Maximum Permitted Vehicle Speeds up to 200km/h:

$$\varphi' = \frac{K}{1 - K + K^4} \qquad \text{(D.2)}$$

with:

$$K = \frac{v}{160} \qquad \text{for L} \leq 20 \text{ m} \qquad \text{(D.3)}$$

$$K = \frac{v}{47{,}16 L^{0{,}408}} \qquad \text{for L} > 20 \text{ m} \qquad \text{(D.4)}$$

and

$$\varphi'' = 0{,}56 e^{-\frac{L^2}{100}} \qquad \text{(D.5)}$$

where:

v is the Maximum Permitted Vehicle Speed [m/s]
L is the determinant length L_Φ [m] in accordance with 6.4.5.3

Extraits annexe C de EN 1991-2: 2023 (Dynamic factors 1 + φ for Real Trains)

(2) The dynamic factors $1 + \varphi$ are also used for fatigue damage calculations.

(3)P The static load due to a Real Train at v [m/s] shall be multiplied by:

either, $1 + \varphi = 1 + \varphi' + \varphi''$ for track with standard maintenance (C.1)

or, $1 + \varphi = 1 + \varphi' + 0{,}5\ \varphi''$ for carefully maintained track (C.2)

NOTE The National Annex may specify whether expression (C.1) or (C.2) may be used. Where the expression to be used is not specified, expression (C.1) is recommended.

with:

$$\varphi' = \frac{K}{1 - K + K^4} \quad \text{for } K < 0{,}76 \tag{C.3}$$

and

$$\varphi' = 1{,}325 \quad \text{for } K \geq 0{,}76 \tag{C.4}$$

where: $$K = \frac{v}{2L_\Phi \times n_0} \tag{C.5}$$

and

$$\varphi'' = \frac{\alpha}{100}\left[56e^{-\left(\frac{L_\Phi}{10}\right)^2} + 50\left(\frac{L_\Phi n_0}{80} - 1\right)e^{-\left(\frac{L_\Phi}{20}\right)^2}\right] \tag{C.6}$$

$\varphi'' \geq 0$

with: $\alpha = \frac{v}{22}$ if $v \leq 22$ m/s (C.7)

$\alpha = 1$ if $v > 22$ m/s

where:

v is the Maximum Permitted Vehicle Speed [m/s]

n_0 is the first natural bending frequency of the bridge loaded by permanent actions [Hz]

L_Φ is the determinant length [m] in accordance with 6.4.5.3.

α is a coefficient for speed

(4)P The values of $\varphi' + \varphi''$ shall be determined using upper and lower limiting values of n_0, unless it is being made for an individual bridge of known first natural frequency.

The upper limit of n_0 is given by:

$$n_0 = 94{,}76L_\Phi^{-0{,}748} \tag{C.8}$$

and the lower limit is given by:

$$n_0 = \frac{80}{L_\Phi} \quad \text{for } 4\text{ m} \leq L_\Phi \leq 20\text{ m} \tag{C.9}$$

$$n_0 = 23{,}58L_\Phi^{-0{,}592} \quad \text{for } 20\text{ m} < L_\Phi \leq 100\text{ m} \tag{C.10}$$

7 Modélisation du trafic réel

Le facteur λ_1 est le rapport entre deux différences de contraintes (voir section 5.2) :

$$\lambda_1 = \frac{\Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma(Q_{fat})}$$

où :

- $\Delta\sigma_{E,2}$: différence de contrainte équivalente obtenue à partir de l'historique obtenu avec le modèle de trafic réel circulant sur l'ouvrage
- $\Delta\sigma(Q_{fat})$: différence de contraintes de référence obtenue avec le modèle de charge de fatigue de la norme

Afin de recalculer les courbes pour la mise à jour du facteur lambda, il est nécessaire d'utiliser des modèles réalistes des trafics circulant sur les voies en Suisse pour effectuer le calcul du cumul de dommage par fatigue. Ces modèles doivent être aussi proches que possible du trafic réel, actuel et prévu sur les différentes lignes, sinon les facteurs de dommage équivalent ne seraient pas une bonne représentation des différentes lignes en Suisse, ni des évolutions futures.

Deux solutions possibles pour déterminer les facteurs lambda de dommage équivalent pourraient être utilisées dans l'algorithme. Il est possible soit d'utiliser un ensemble défini de trains (par exemple et par analogie, pour la norme prEN1993-2: 2022, l'ensemble de camions "standard" du FLM4 de l'EN 1991-2 a été utilisé pour les ponts routiers), soit des données de trafic réel obtenues auprès des opérateurs ferroviaires.

En Suisse, nous disposons d'une large base de données du trafic ferroviaire qui minimise les hypothèses à faire pour effectuer des simulations. En effet, les opérateurs ferroviaires ont fourni les géométries réelles et le poids des essieux basé sur les fiches techniques et l'occupation maximale du train. Ils ont également donné par ligne le nombre de trains par jour et la composition sur la base de l'horaire des lignes et de la planification future. La seule hypothèse faite par l'EPFL, à partir des données des opérateurs ferroviaires, a été celle d'estimer la charge variable moyenne générée par les occupants et le fret. Après analyse des données, il a été décidé avec l'OFT de prendre une hypothèse conservatrice en fixant la charge variable moyenne à **30% de la charge variable maximale**.

Par rapport au trafic routier, la modélisation du trafic ferroviaire réel requiert moins de variables car la distance entre les véhicules, la combinaison de plusieurs véhicules dans la même direction et la congestion du trafic ne sont pas des paramètres liés au trafic ferroviaire. Lorsqu'il s'agit d'utiliser des données ferroviaires réelles, on dispose déjà de toutes les données de trafic nécessaires. Cependant, pour recalculer les valeurs λ_1, il faut déterminer quels sont les types de trafic pertinents, et effectuer une analyse spécifique des données pour les sélectionner. Cette section décrit les différentes bases de données de trafic réel et les hypothèses de trafic qui ont été utilisées pour calibrer les facteurs lambda qui reflètent au mieux les conditions actuelles et futures du trafic ferroviaire à voie étroite en Suisse.

7.1 Introduction du trafic réel

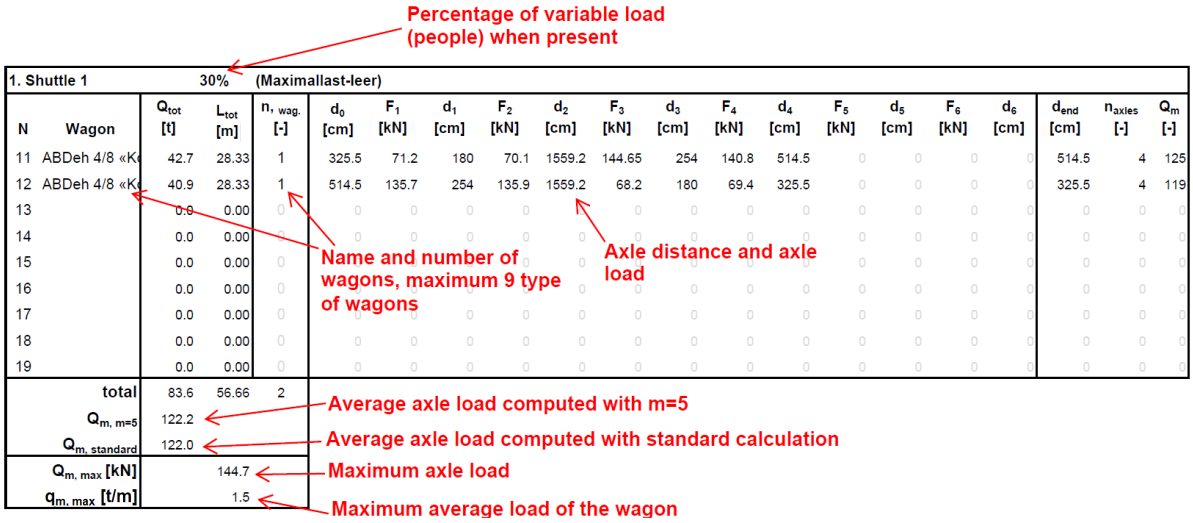


Figure 7.1 – Tableau Excel qui définis la géométrie de chaque train

Le trafic réel provient des données fournies par l'autorité de surveillance de chaque ligne. Il est introduit sous forme de matrice avec comme données de base les caractéristiques de chaque type de trains, leur composition de wagons, leur géométrie et le poids par essieu.
Chaque type de train est défini dans un tableau spécifique (Figure 7.1) avec sa propre géométrie, les essieux de chaque wagon, le poids de chaque essieu et la composition en nombre de wagons. Une variable de ±10% a été appliqué à chaque essieu pour avoir une plus grande variation des cycles, pour modéliser des cycles avec un chargement défavorable et obtenir ainsi une meilleure stabilité des simulations près de la limite de fatigue.

La matrice créée par le logiciel génère un nombre très élevé de trains. Le choix de chaque train est fait en manière aléatoire, en utilisant les pourcentages de chaque type de train inséré dans le tableau de la Figure 7.2. Ce tableau donne aussi des données sur le poids moyen, le tonnage par année, et le nom des trains, qui peut être utile pour l'interprétation des données.

Ces groupes de trains comprennent également les trains de marchandises, qui ont été inclus même s'ils représentent un pourcentage plus faible. Les trains destinés à manutention de l'installation ferroviaire, en revanche, ne sont pas inclus car ils sont en nombre négligeable.

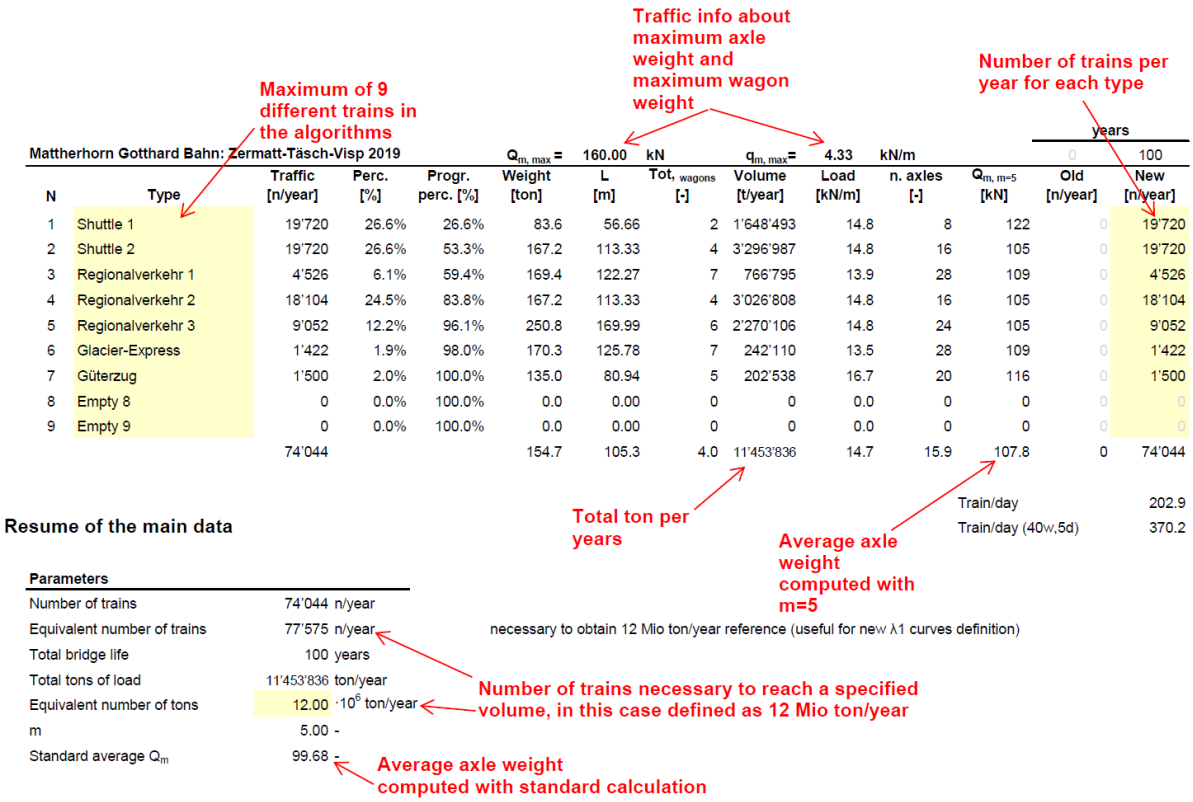


Figure 7.2 – Tableau Excel qui définit les types de trains

Enfin, pour définir le nombre total de trains, il est nécessaire d'indiquer dans les paramètres du logiciel si l'on utilise le nombre exact de trains indiqué par l'autorité de surveillance (par exemple pour obtenir le dommage d'une structure existante sur une ligne spécifique) ou si l'on varie le nombre des trains pour arriver à un volume défini pour obtenir des courbes λ_1 (par exemple en utilisant un volume de 12 Mio tonnes/an correspondant au V_0 du λ_2).

La distance entre les trains a été admise égale à 1'000 m pour éviter d'avoir plusieurs trains sur la même ligne d'influence, étant donné que le calcul du λ_1 ne tient pas compte des croisements de trains ni de trains voyageant en parallèle.

Ce système de matrices générées à travers les tableaux a été vérifié en introduisant manuellement dans l'algorithme les trains et la composition du « standard traffic mix with axle weight ≤ 22,5 t » de la norme EN 1991-2. Dans un deuxième temps, les données ont été introduites avec le système des tableaux décrit précédemment. Les courbes λ_1 générées par les deux méthodes sont identiques.

Un total de 42 lignes de chemin de fer à voies étroites a été utilisé, issues des compagnies suivantes:

- Matterhorn Gotthard Bahn
- Compagnie du chemin de fer Montreux Oberland Bernois
- Rhätische Bahn
- Die Zentralbahn

Un taux d'occupation de 30% a été considéré. Les données de ces lignes ont été résumé dans l'Annexe C et D. Le calcul inclut un certain pourcentage de trains de marchandises.

Ces lignes présentent toujours une locomotive avec des essieux entre 155 et 160 kN, les trains sont donc toujours assimilables au modèle de charge LM5. Le modèle LM4 peut être utilisé pour les trams (voir paragraphe 13).

7.1.1 Matterhorn Gotthard Bahn

Les lignes du Matterhorn Gotthard Bahn, représentées dans la Figure 7.3, relient les villes de Disentis, Andermatt, Fiesch et Zermatt. Les principales lignes analysées sont :

- Andermatt – Dieni – Disentis, 2019
- Andermatt – Dieni – Disentis, 2028
- Fiesch – Oberwald – Andermatt, 2019
- Fiesch – Oberwald – Andermatt, 2028
- Oberwald – Realp, 2019
- Oberwald – Realp, 2028
- Zermatt – Täsch – Visp, 2019
- Zermatt – Täsch – Visp, 2028



Figure 7.3 – Plan du Matterhorn Gotthard Bahn

Cette compagnie de chemin de fer possède un trafic qui varie entre 1,4 Mio/tonnes par an pour la ligne Andermatt-Dieni-Disentis (10'936 trains par an en 2019) jusqu'à 11,4 Mio/tonnes par an pour la ligne Zermatt-Täsch-Visp (74'044 trains par an en 2019).

Tous les lignes de cette compagnie ont une charge maximale par essieu Q_{max} de 160 kN, il est donc nécessaire d'utiliser dans les simulations un modèle de charge 5. Le poids moyen maximal par essieu $Q_{m,max}$ est de 115,5 kN et a été observé dans les données de la ligne Andermatt-Dieni-Disentis de 2019.

7.1.2 Compagnie du chemin de fer Montreux Oberland Bernois

La ligne du Compagnie du chemin de fer Montreux Oberland Bernois, représenté dans la Figure 7.4, relie les villes de Montreux et Zweisimmen et comprend également la ligne Montreux-Vevey Riviera (MVR). Les principales lignes analysées sont :

- Montreux – Gstaad – Zweisimmen, 2021
- Montreux – Gstaad – Zweisimmen, 2030
- Montreux – Gstaad – Zweisimmen, 2031
- Vevey – Les Pléiades, 2021
- Vevey – Les Pléiades, 2031

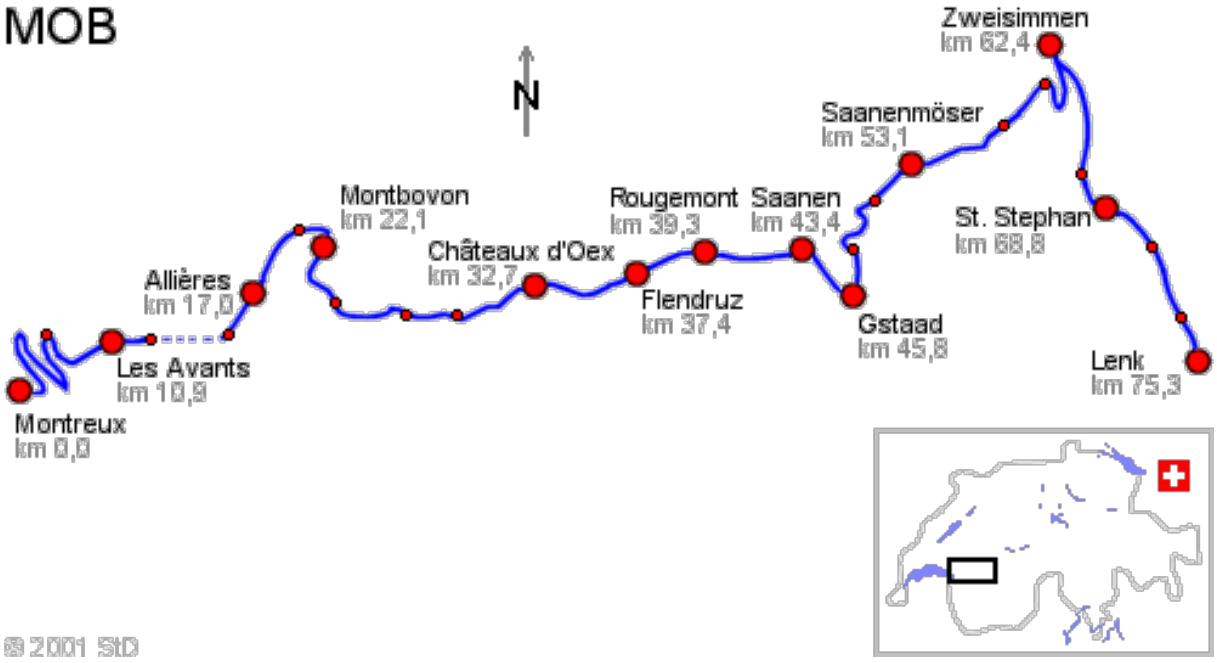


Figure 7.4 – Plan de la Compagnie du chemin de fer Montreux Oberland Bernois

Cette compagnie de chemin de fer possède un trafic qui varie entre 2,8 Mio/tonnes par an pour la ligne Vevey-Les Pléiades (43'800 trains par an en 2021) jusqu'à 6,8 Mio/ton par an pour la ligne Montreux-Gstaad-Zweisimmen (42'340 trains par an prévus en 2031).

Toutes les lignes de cette compagnie ont une charge maximale par essieux Q_{max} de 155 kN, il est donc nécessaire d'utiliser dans les simulations un modèle de charge 5. Le poids moyen maximal par essieu $Q_{m,max}$ est de 126,8 kN et a été observé dans les données de la ligne Vevey-Les Pléiades. Cette valeur est une valeur extrême étant donné que la ligne possède un seul type de train : Double automotrice 7500 (Abeh ZR GTW 2/6).

7.1.3 Rhätische Bahn

Les lignes du Rhätische Bahn, représentées dans la Figure 7.5, relient les villes de Landquart, Pontresina, Ilanz, Thusis, Bergün etc. Les principales lignes analysées sont :

- Landquart – Schiers, 2020
- Samedan – Pontresina, 2020
- Surselvalinie – Reichenau – Ilanz, 2020

- Thusis – Bergün, 2020
- Thusis – Samedan, 2020



Figure 7.5 – Plan du Rhätische Bahn

Cette compagnie du chemin de fer possède un trafic qui varie entre 0,6 Mio/tonnes par an pour la ligne Thusis-Samedan (2'000 trains par an en 2020) jusqu'à 7,2 Mio/ton par an pour la ligne Landquart-Schiers (45'170 trains par an en 2020).

Toutes les lignes de cette compagnie ont une charge maximale par essieu Q_{max} de 160 kN, il est donc nécessaire d'utiliser dans les simulations un modèle de charge 5. Le poids moyen maximal par essieu $Q_{m,max}$ est de 119,0 kN et a été observé dans les données de la ligne Thusis-Samedan. Cette valeur est une valeur extrême étant donné que la ligne possède un volume très bas et un seul type de train : Regelgüterzug.

7.1.4 Die Zentralbahn

Les lignes Die Zentralbahn, représentées dans la Figure 7.5, relient les villes de Luzern, Interlaken Ost et Engelberg. Les principales lignes analysées sont :

- Giswil – Meiringen, 2021, 2030 et 2045
- Hergiswil – Sachseln, 2021, 2030 et 2045
- Hergiswil – Stans, 2021, 2030 et 2045
- Luzern – Hergiswil, 2021, 2030 et 2045
- Meiringen – InterlakenOst, 2021, 2030 et 2045

- Sachseln – Giswil, 2021, 2030 et 2045
- Stans – Wolfenschiessen, 2021, 2030 et 2045
- Wolfenschiessen – Engelberg, 2021, 2030 et 2045

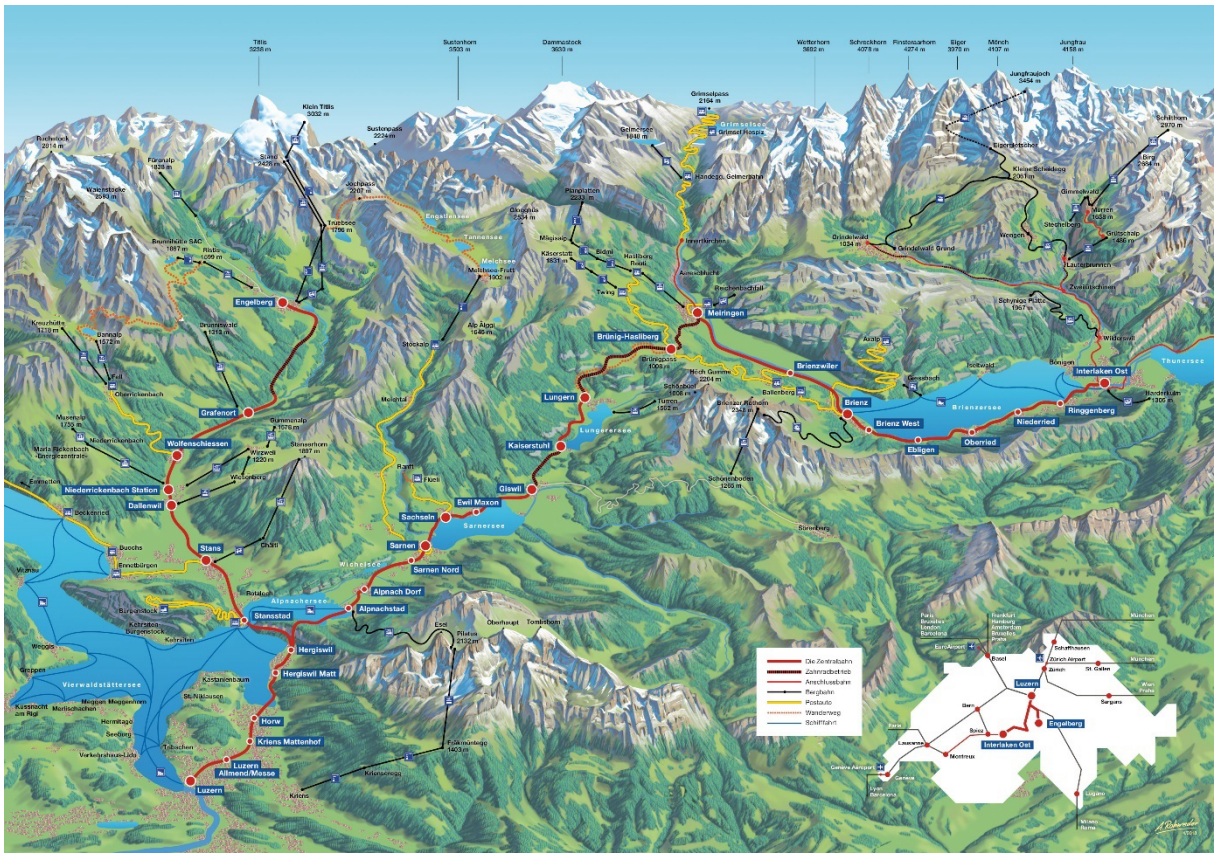


Figure 7.5 – Plan des lignes de la compagnie Die Zentralbahn

Cette compagnie du chemin de fer possède un trafic qui varie entre 2,3 Mio/tonnes par an pour la ligne Wolfenschiessen-Engelberg (13'492 trains par an en 2021) jusqu'à 14,9 Mio/tonnes par an pour la ligne Luzern-Hergiswil (110'370 trains par an prévus en 2045). Ce dernier est un cas extrême étant donné que l'on a déjà une augmentation du volume de 20% entre 2021 et 2030 (de 10,1 à 12,0 Mio/ton par année) et qu'une augmentation ultérieure de 28% est nécessaire pour arriver à 14,9 Mio/tonnes par an.

Toutes les lignes de cette compagnie ont une charge maximale par essieux Q_{max} de 157,5 kN, il est donc nécessaire d'utiliser dans les simulations un modèle de charge 5. Le poids moyen maximal par essieu $Q_{m,max}$ est de 118,7 kN et a été observé dans les données de la ligne Wolfenschiessen-Engelberg avec les prévisions de 2030 et 2045.

7.2 Trafic selon EN 1991-2 (trafic ferroviaire à voie normale)

Un autre trafic cité dans ce rapport est celui utilisé pour obtenir la courbe λ_1 actuellement dans les normes pour le trafic ferroviaire à voie normale de la norme SIA 261.

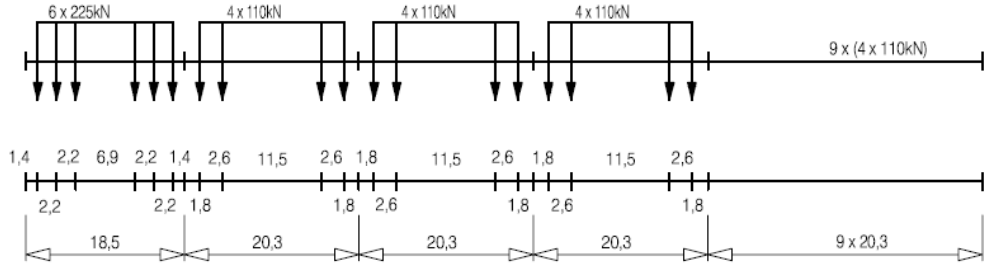
Ce trafic est composé de 8 types de trains, pour un volume total d'environ 25 Mio tonnes/an. Ce trafic Il est très lourd et n'est pas représentatif du trafic suisse sur voies étroites. Il a été utilisé uniquement comme trafic de référence pour développer l'algorithme et pour le valider.

Tableau 7.1 –Type des trains « Standard traffic mix with axle weight ≤ 22,5 t » Tab. D.1 de la norme EN 1991-2

Train type	Number of trains/day	Mass of train [t]	Traffic volume [10^6t/year]
1	12	663	2,90
2	12	530	2,32
3	5	940	1,72
4	5	510	0,93
5	7	2160	5,52
6	12	1431	6,27
7	8	1035	3,02
8	6	1035	2,27
	67		24,95

Type 1 Locomotive-hauled passenger train

$\Sigma Q = 6630\text{kN}$ $V = 200\text{km/h}$ $L = 262{,}10\text{m}$ $q = 25{,}3\text{kN/m'}$



Type 2 Locomotive-hauled passenger train

$\Sigma Q = 5300\text{kN}$ $V = 160\text{km/h}$ $L = 281{,}10\text{m}$ $q = 18{,}9\text{kN/m'}$

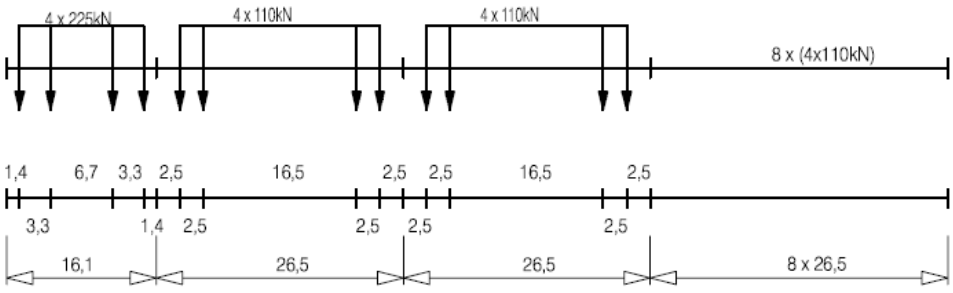


Figure 7.6 – Géométries des trains de type 1 et 2 du « Standard traffic mix with axle weight ≤ 22,5 t » de la norme EN 1991-2

7.3 Trafic spécifique réel

L'algorithme développé par l'EPFL permet de modéliser tous les types de trafic possibles en fonction des types de trains et de leur géométrie. Cela permet de vérifier le dommage d'un détail spécifique sans utiliser les types de trains les plus défavorables, qui constituent la base pour le calcul de la courbe λ_1, mais d'utiliser les trains réels qui circulent sur une certaine ligne, en obtenant un résultat plus réaliste et moins conservateur.

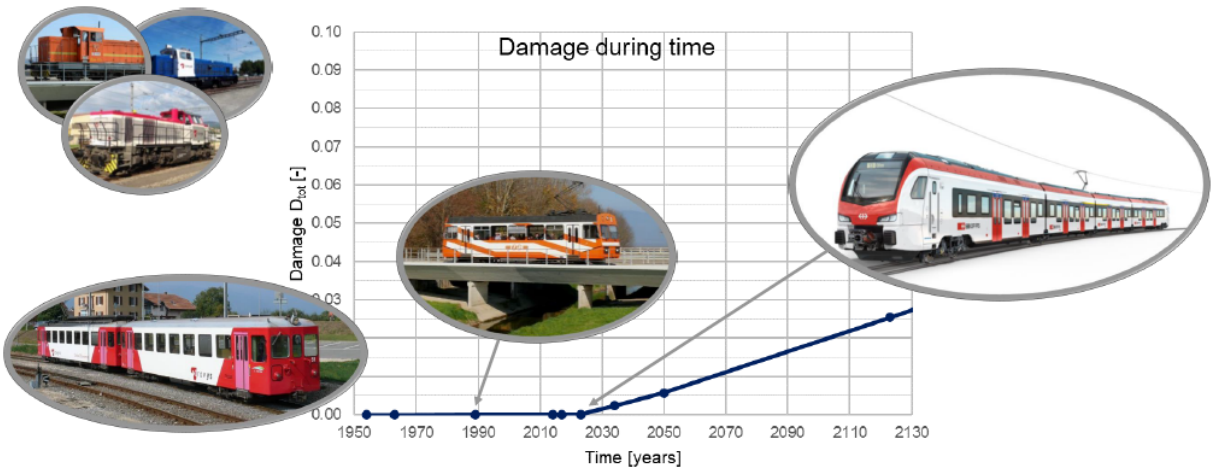


Figure 7.7 – Exemple de l'évolution du dommage sous trafic réel

La figure 7.8 montre l'exemple d'une ligne à voie normale située à Orbe (VD), utilisée pendant 70 ans par un type de train très léger qui n'a causé aucun dommage théorique en fatigue. L'introduction d'un nouveau modèle de train, plus lourd, va créer un endommagement en fatigue ; on arrive ainsi à 4% de dommage à la fin de la durée de service de l'ouvrage, ce qui reste très faible et sans conséquence.

Notons que l'utilisation des courbes λ_1 de la norme SIA, ou le calcul par cumul de dommages avec les trains de la norme EN 1991-2 (décrit dans le paragraphe précèdent), auraient conduits à un résultat différent, vérification non satisfaisante, car considérant un trafic beaucoup plus lourd et des configurations de trains plus critiques.

7.4 Définition d'un trafic standardisé

La définition des nouvelles courbes λ_1 peut être fait avec deux approches : la première possibilité est d'utiliser directement les données du trafic réel comme décrit précédemment; l'autre possibilité est de recréer un trafic standardisé basé sur les géométries et les compositions des trains réels et qui couvre de manière conservatrice tous les trafics des lignes suisses.

Pour le trafic ferroviaire à voie normale, la norme EN et la SIA 261 utilisent cette deuxième approche, en utilisant le trafic montré dans le paragraphe 7.2. Dans notre cas, la puissance des algorithmes permet de ne pas définir de trafic standardisé mais d'utiliser directement les données de chaque ligne à voie étroite.

Cette approche permet aussi de limiter les modifications dans la norme SIA. En effet, pour les voies normales, on utilise le trafic standardisé présenté dans l'EN 1991-2. En revanche, pour les voies étroites, il aurait été nécessaire de définir un trafic standardisé dans la norme SIA car l'EN n'en contient pas.

7.5 Effets dynamiques

Comme discuté au chapitre 6, en ce qui concerne le facteur d'amplification dynamique, la norme actuelle manque de cohérence dans le calcul pour la définition des courbes λ_1. En effet, le calcul de la différence de contrainte équivalent à 2 Millions des cycles $\Delta\sigma_{E2}$ avec le cumul de dommages utilise un coefficient dynamique moins conservateur, 1+ φ, spécifique pour la fatigue et plus proche des effets dynamiques d'essieux de trains réels, tel que défini dans la norme EN 1991-2 Annexe D et utilisé dans la SIA 269/1 pour le Tableau 7.2. Par contre, le calcul de la différence de contrainte du modèle de charge $\Delta\sigma(Q_{fat})$ utilise un coefficient dynamique plus conservateur décrit dans le paragraphe 6.4.5 de la norme EN 1991-2.

Après discussion au sein du groupe de travail, il a été décidé de rendre homogène les coefficients dynamiques utilisés pour les deux calculs de différence de contrainte, donc cohérents également les calculs entre les différents normes et types de voies.

Tableau 7.2 – Coefficient dynamique 1+ φ pour l'état limite de type 4 (fatigue), ponts existants. SIA 269/1, Annexe A.

l_Φ [m]	Vitesse maximale autorisée pour les classes de lignes et les trains en service [km/h]														
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	120	140	160	180	200
1	1,03	1,06	1,08	1,11	1,14	1,17	1,20	1,23	1,24	1,25	1,27	1,30	1,33	1,36	1,40
2	1,03	1,06	1,09	1,12	1,15	1,18	1,21	1,24	1,25	1,26	1,27	1,29	1,33	1,36	1,39
4	1,03	1,06	1,09	1,12	1,15	1,19	1,22	1,25	1,25	1,26	1,27	1,29	1,31	1,34	1,38
6	1,03	1,06	1,09	1,12	1,15	1,18	1,21	1,24	1,24	1,25	1,26	1,27	1,29	1,32	1,36
8	1,03	1,05	1,08	1,11	1,14	1,16	1,19	1,22	1,22	1,23	1,24	1,25	1,26	1,30	1,33
10	1,02	1,05	1,07	1,10	1,12	1,15	1,17	1,20	1,20	1,20	1,21	1,23	1,24	1,28	1,31
15	1,02	1,04	1,05	1,07	1,09	1,11	1,12	1,14	1,15	1,15	1,16	1,17	1,21	1,24	1,27
20	1,01	1,03	1,04	1,05	1,06	1,08	1,09	1,10	1,11	1,11	1,13	1,16	1,19	1,23	1,26
25	1,01	1,02	1,03	1,04	1,04	1,05	1,06	1,08	1,09	1,10	1,12	1,14	1,17	1,20	1,23
30	1,01	1,02	1,02	1,03	1,04	1,05	1,06	1,07	1,08	1,09	1,11	1,13	1,16	1,18	1,21
40	1,01	1,01	1,02	1,03	1,04	1,04	1,05	1,06	1,07	1,08	1,09	1,11	1,13	1,15	1,18
50	1,01	1,01	1,02	1,03	1,03	1,04	1,05	1,05	1,06	1,07	1,08	1,10	1,12	1,14	1,16
60	1,01	1,01	1,02	1,02	1,03	1,04	1,04	1,05	1,06	1,06	1,08	1,09	1,11	1,12	1,14
70	1,01	1,01	1,02	1,02	1,03	1,03	1,04	1,05	1,05	1,06	1,07	1,09	1,10	1,12	1,13
80	1,00	1,01	1,02	1,02	1,03	1,03	1,04	1,04	1,05	1,05	1,07	1,08	1,09	1,11	1,12
100	1,00	1,01	1,01	1,02	1,02	1,03	1,03	1,04	1,04	1,05	1,06	1,07	1,08	1,10	1,11

Tableau 7.3 – Calcul du coefficient dynamique, a) situation actuelle et b) proposition

a) Calcul du facteur dynamique	**Vérification avec la limite de fatigue**	**Vérification avec le cumul des dommages**	**Vérification avec la méthode d'équivalence des dommages (méthode λ)**
SIA 261, voie standard	§11.3.1 SIA 261 ≡ §6.4.5 EN 1991-2 pour voies bien entretenues	EN 1991-2, Annexe D selon SIA 261 11.4.1.2	§11.3.1 SIA 261 ≡ §6.4.5 EN 1991-2 pour voies bien entretenues
SIA 261, voie étroite	§11.3.1 SIA 261 ≡ §6.4.5 EN 1991-2 pour voies bien entretenues	EN 1991-2, Annexe D selon SIA 261 11.4.1.2	§11.3.1 SIA 261 ≡ §6.4.5 EN 1991-2 pour voies bien entretenues

SIA 269/1, voie standard	§11.3.1 SIA 261 ≡ §6.4.5 EN 1991-2 pour voies bien entretenues	EN 1991-2, Annexe D selon SIA 261 11.4.1.2	§11.3.1 SIA 261 ≡ §6.4.5 EN 1991-2 pour voies bien entretenues
SIA 269/1, voie étroite	Tab. 4, Annexe A, SIA 269/1 ≡ EN 1991-2, Annexe D	EN 1991-2, Annexe D selon SIA 261 11.4.1.2	§11.3.1 SIA 261 ≡ §6.4.5 EN 1991-2 pour voies bien entretenues

↓

b) Calcul du facteur dynamique	**Vérification avec la limite de fatigue**	**Vérification avec le cumul des dommages**	**Vérification avec la méthode d'équivalence des dommages (méthode λ)**
SIA 261, voie standard	EN 1991-2, Annexe D selon SIA 261 11.4.1.2	EN 1991-2, Annexe D selon SIA 261 11.4.1.2	EN 1991-2, Annexe D selon SIA 261 11.4.1.2
SIA 261, voie étroite	EN 1991-2, Annexe D selon SIA 261 11.4.1.2	EN 1991-2, Annexe D selon SIA 261 11.4.1.2	EN 1991-2, Annexe D selon SIA 261 11.4.1.2
SIA 269/1, voie standard	Tab. 4, Annexe A, SIA 269/1 ≡ EN 1991-2, Annexe D	EN 1991-2, Annexe D selon SIA 261 11.4.1.2	Tab. 4, Annexe A, SIA 269/1 ≡ EN 1991-2, Annexe D
SIA 269/1, voie étroite	Tab. 4, Annexe A, SIA 269/1 ≡ EN 1991-2, Annexe D	EN 1991-2, Annexe D selon SIA 261 11.4.1.2	Tab. 4, Annexe A, SIA 269/1 ≡ EN 1991-2, Annexe D

Il faut rappeler que ce travail se concentre sur les lignes à voie étroite. Des modifications des coefficients dynamiques des ponts à voie normale de la norme SIA 261 ne font pas partie de cette étude, cela ne représente donc qu'une recommandation pour d'éventuels travaux futurs.

Grâce à la proposition, l'utilisation du coefficient dynamique pour la définition des nouvelles courbes λ_1 devient donc inutile, comme montré dans la formule suivante :

$$\lambda_1 = \frac{\Phi_{\mathrm{fat}} \cdot \Delta\sigma_{\mathrm{E},2}}{\Phi_{\mathrm{fat}} \cdot \Delta\sigma(\mathrm{Q}_{\mathrm{fat}})} = \frac{\Delta\sigma_{\mathrm{E},2}}{\Delta\sigma(\mathrm{Q}_{\mathrm{fat}})}$$

Cette simplification permet d'avoir une seule courbe et de négliger les autres paramètres comme la vitesse et la longueur dynamique, pouvant affecter les résultats.

Cette simplification peut être faite uniquement pour la définition de la courbe λ_1. Dans la formule de vérification d'un détail à la fatigue, le coefficient dynamique possède un rôle très important pour obtenir une différence de contrainte qui contienne les effets dynamiques, comme indiqué dans la formule de vérification complète suivante :

$$\gamma_{\mathrm{Ff}} \cdot \Phi_{\mathrm{fat}} \cdot \Delta\sigma_{\mathrm{E},2} = \lambda \cdot \Phi_{\mathrm{fat}} \cdot \Delta\sigma(\mathrm{Q}_{\mathrm{fat}}) \leq \frac{\Delta\sigma_{\mathrm{C}}}{\gamma_{\mathrm{Mf}}}$$

avec $\Phi_{\mathrm{fat}} = 1 + \varphi$ selon l'EN1991-2, annexe D.

8 Génération de l'histogramme des cycles de contraintes

8.1 Historique des contraintes et histogramme des cycles

Dans cette section, quelques résultats sont présentés pour comprendre et illustrer la façon dont les algorithmes fonctionnent et comment les résultats dépendent de la longueur et du type de ligne d'influence, ceci pour:

- deux lignes d'influence (moment à mi-portée d'une seule travée 1S-MM et moment d'appui de trois travées 3S-SM) avec des portées de 100 m, 10 m et 2 m ;
- différents nombres et types de passages (1 véhicule, 1 train, 10 trains, 100 trains, 10'000 trains).

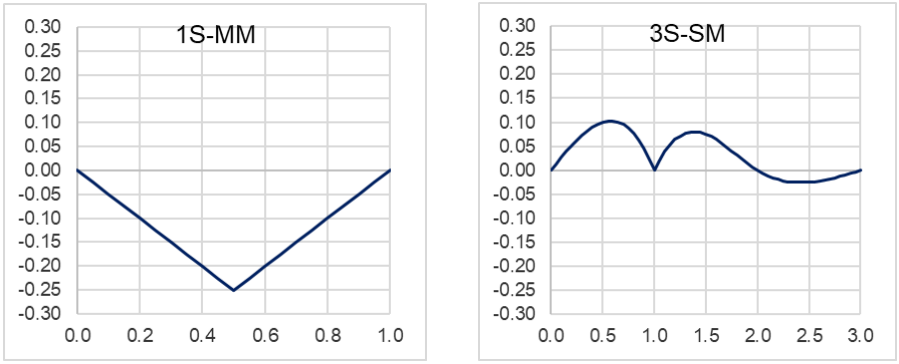


Figure 8.1 –Lignes d'influence pour les cas 1S-MM et 3S-SM

Il faut noter que le module de résistance W_{el} va varier selon le cas pour obtenir un dommage D= 1,00. Les contraintes dans cet exemple peuvent donc avoir des valeurs irréalistes utiles, il ne faut regarder que la forme de l'historique des contraintes et de l'histogramme des cycles.

Le véhicule unique utilisé dans les paragraphes suivants correspond à la locomotive He 4/4 II de la Matterhorn Gotthard Bahn sur la ligne Zermatt-Täsch-Visp.

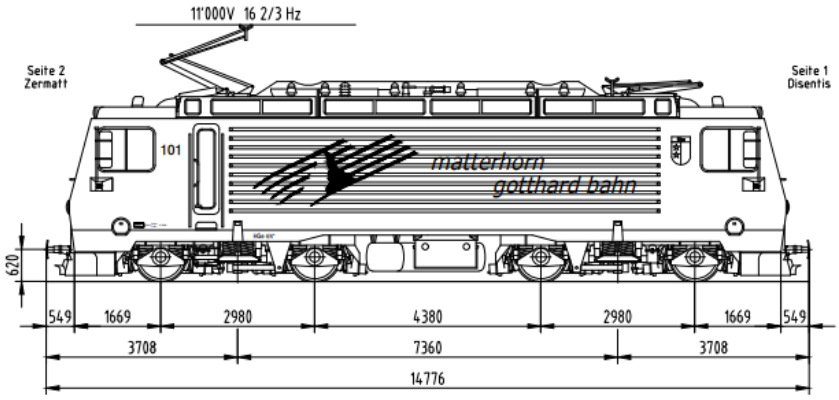


Figure 8.2 – Véhicule, locomotive unique, utilisé dans l'exemple

Ensuite, le train unique utilisé dans les paragraphes suivants correspond à la Regionalverkehr_1 de la Matterhorn Gotthard Bahn sur la ligne Oberwald-Realp et il est composé d'un seul ABeh 8/12 "Orion".

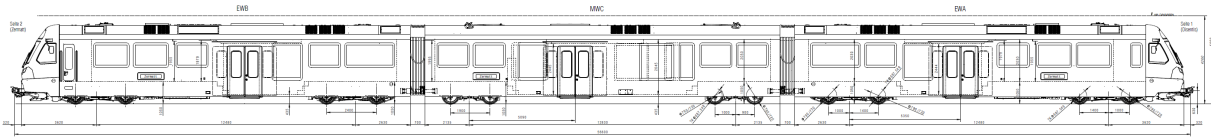


Figure 8.3 – Train unique utilisé dans l'exemple

Le trafic ferroviaire utilisé pour calculer les autres chiffres des paragraphes suivants correspond à la composition de la ligne Zermatt-Täsch-Visp de Matterhorn Gotthard Bahn, sur la base des données de 2019.

8.1.1 1 wagon franchissant une ligne d'influence de 2 m de portée

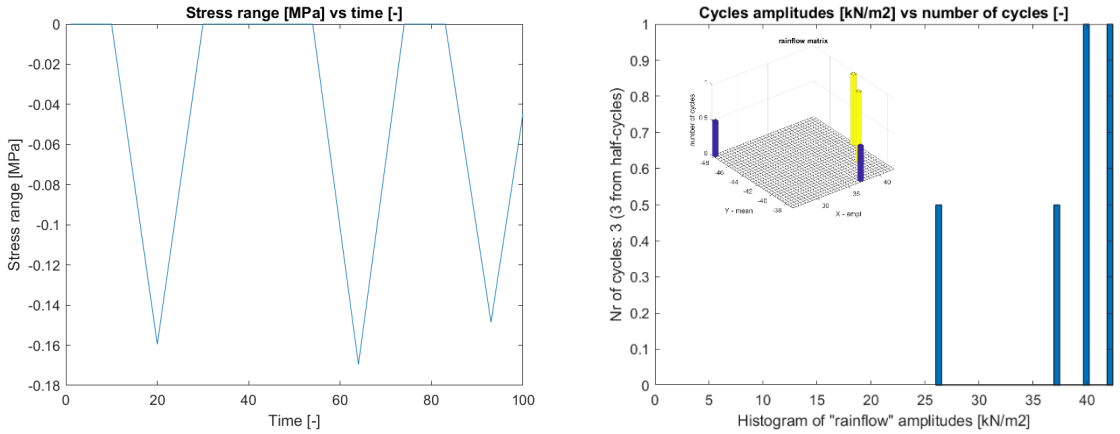


Figure 8.4 – Historique des contraintes (à gauche) et histogramme des cycles (à droite) de la ligne d'influence 1S-MM

Notez que les cycles n'ont pas exactement la même valeur, même si la locomotive He 4/4 II possède quatre essieux égaux, car la variable aléatoire de ±10% qui fait varier les charges des essieux est appliquée (se référer à la section 7.1). La partie gauche de la Figure 8.4 représente seulement 3 cycles parce que la dernière partie de la matrice des charges est coupée pour éviter des erreurs numériques. Cela n'affecte pas les résultats pour les matrices plus grandes (un seul cycle négligé n'affecte pas les résultats, étant donné que l'on a des centaines de milliers de cycles).

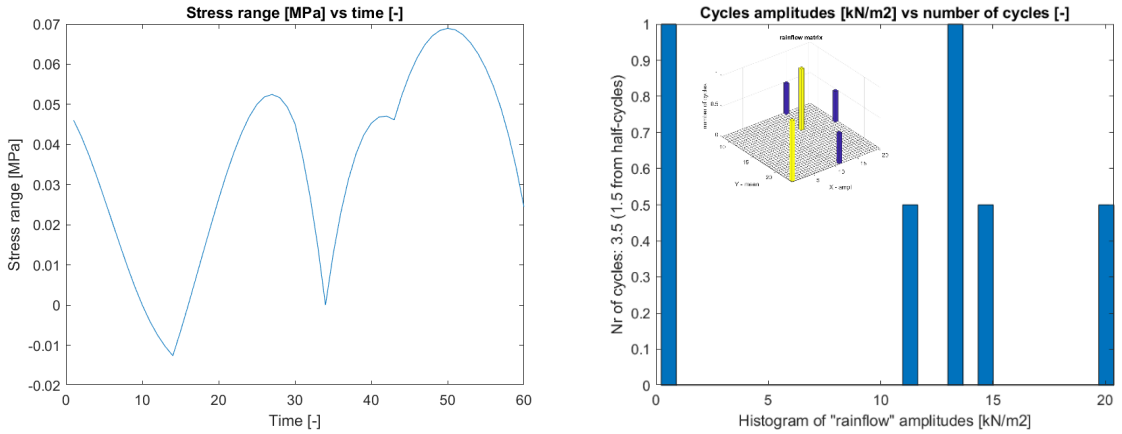


Figure 8.5 – Historique des contraintes (à gauche) et histogramme des cycles (à droite) de la ligne d'influence 3S-SM

8.1.2 1 train traversant une ligne d'influence de 2 m de portée

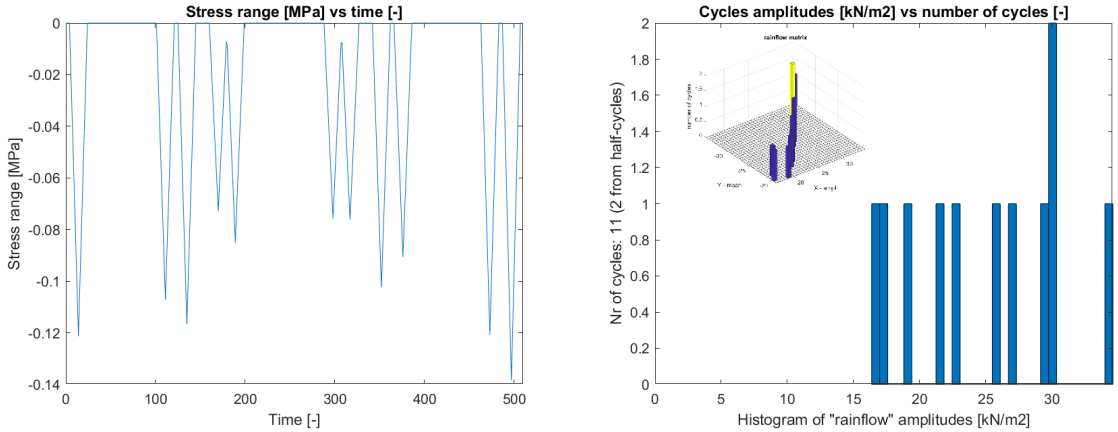


Figure 8.6 – Historique des contraintes (à gauche) et histogramme des cycles (à droite) de la ligne d'influence 1S-MM

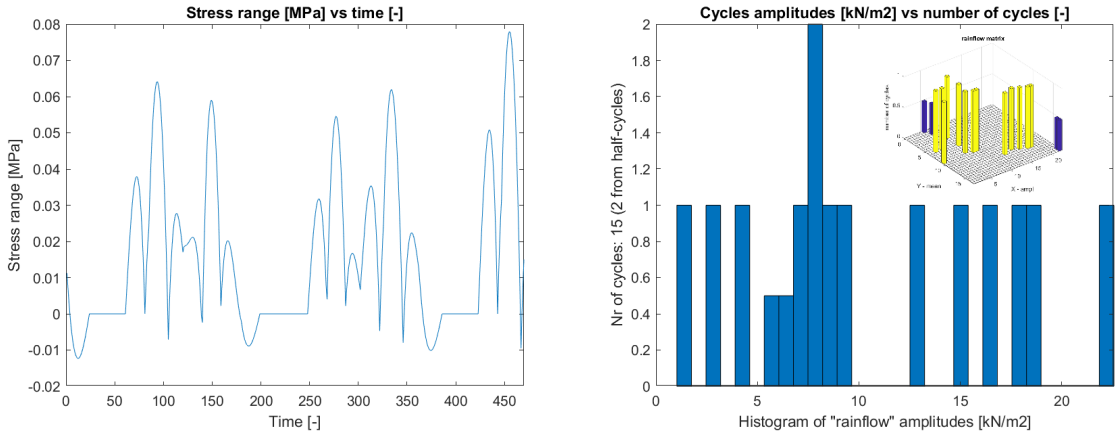


Figure 8.7 – Historique des contraintes (à gauche) et histogramme des cycles (à droite) de la ligne d'influence 3S-SM

8.1.3 1 train traversant une ligne d'influence de 10 m de portée

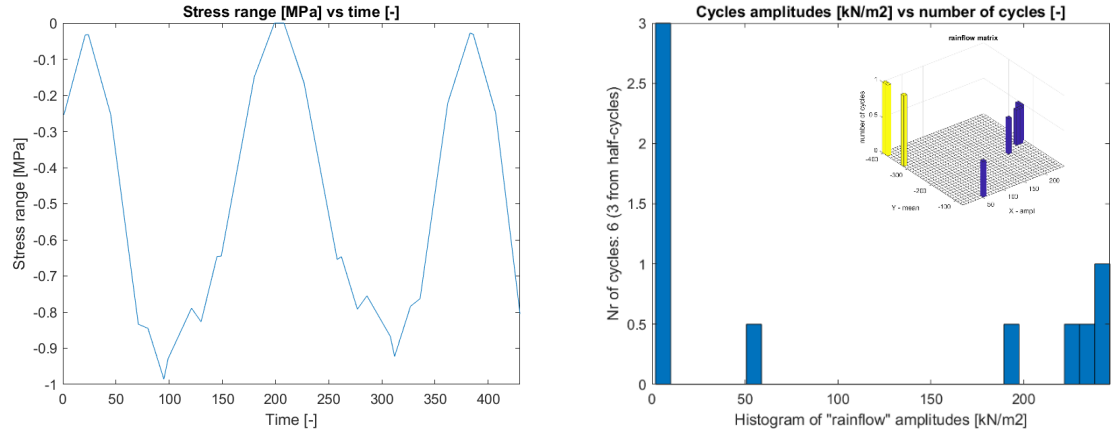


Figure 8.8 – Historique des contraintes (à gauche) et histogramme des cycles (à droite) de la ligne d'influence 1S-MM

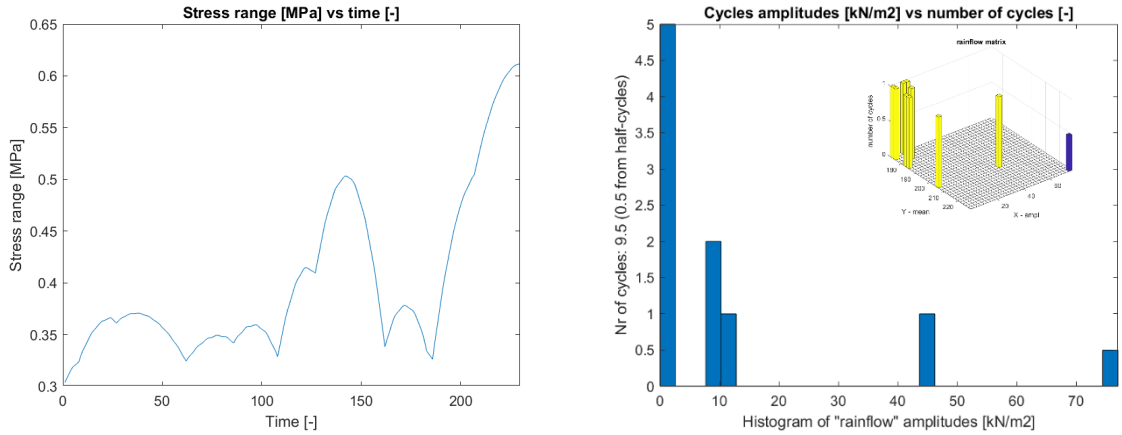


Figure 8.9 – Historique des contraintes (à gauche) et histogramme des cycles (à droite) de la ligne d'influence 3S-SM

Le cas d'un train traversant une travée de 100 m de long n'a pas pu être réalisé en raison du nombre limité de cycles que le train génère. En effet, avec une grande travée, les trains se comportent comme une charge distribuée générant environ un seul cycle à chaque passage. De la même manière, l'exemple avec un seul wagon n'a pas été réalisé car il génère un nombre insuffisant de cycles pour atteindre la convergence de l'algorithme. Dans ces deux cas, on peut conclure que les véhicules utilisés provoquent des dommages en fatigue très faibles.

8.1.4 10 trains traversant une ligne d'influence de 10 m de portée

Dans ce cas, on peut observer un nombre très élevé de cycles car chaque groupe d'essieux génère un ou plusieurs cycles. L'histogramme montre également plusieurs pics qui correspondent aux différents groupes d'essieux.

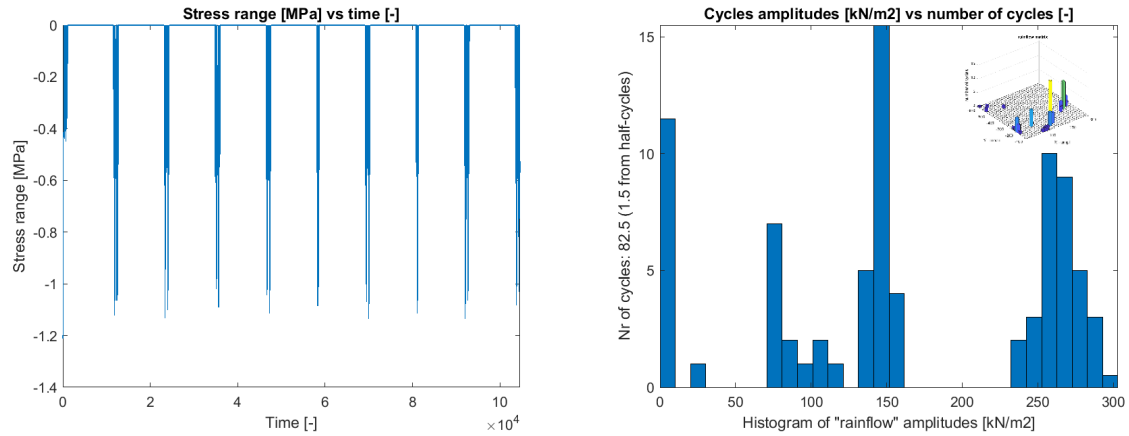


Figure 8.10 – Historique des contraintes (à gauche) et histogramme des cycles (à droite) de la ligne d'influence 1S-MM

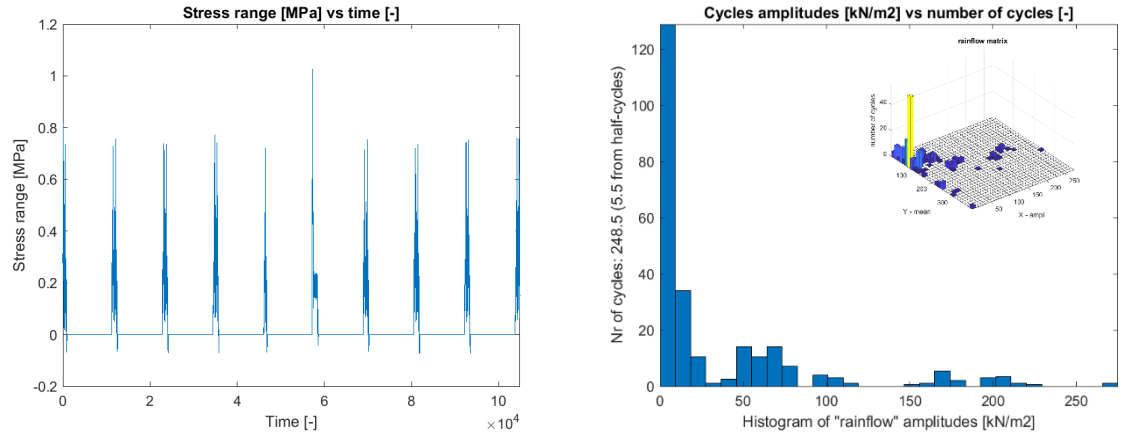


Figure 8.11 – Historique des contraintes (à gauche) et histogramme des cycles (à droite) de la ligne d'influence 3S-SM

8.1.5 10 trains traversant une ligne d'influence de 100 m de portée

Dans ce cas, la grande portée implique des différences de contraintes plus élevées mais un nombre de cycles plus faible, dû à l'effet de plusieurs essieux sur la ligne d'influence en même temps.

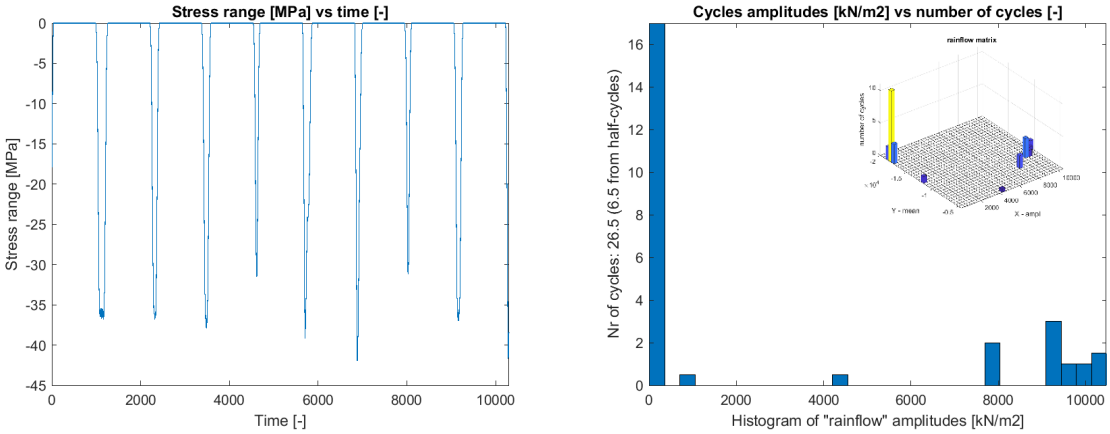


Figure 8.12 – Historique des contraintes (à gauche) et histogramme des cycles (à droite) de la ligne d'influence 1S-MM

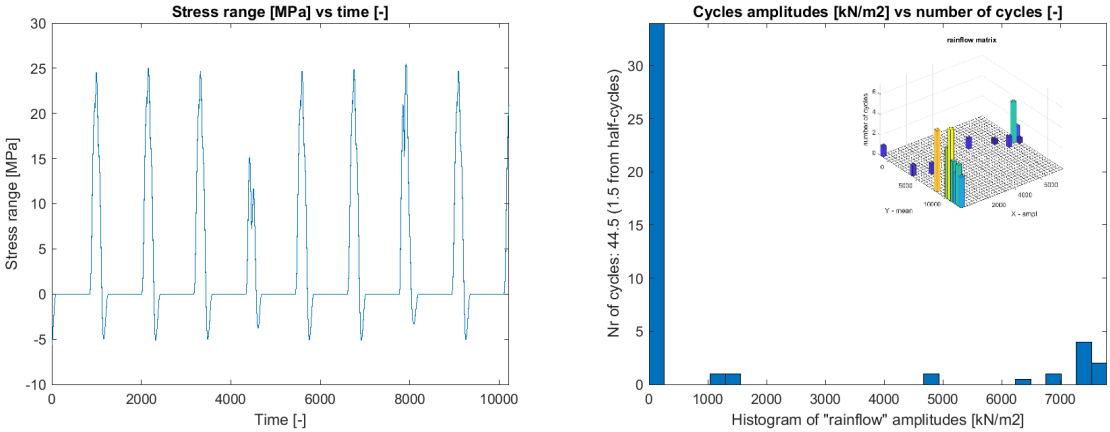


Figure 8.13 – Historique des contraintes (à gauche) et histogramme des cycles (à droite) de la ligne d'influence 3S-SM

8.1.6 100 trains traversant une ligne d'influence de 10 m de portée

Dans ce dernier cas, on peut observer un nombre très élevé de cycles car chaque groupe d'essieux génère un ou plusieurs cycles. L'histogramme montre également plusieurs pics qui correspondent aux différents groupes d'essieux (simple, tandem, triple).

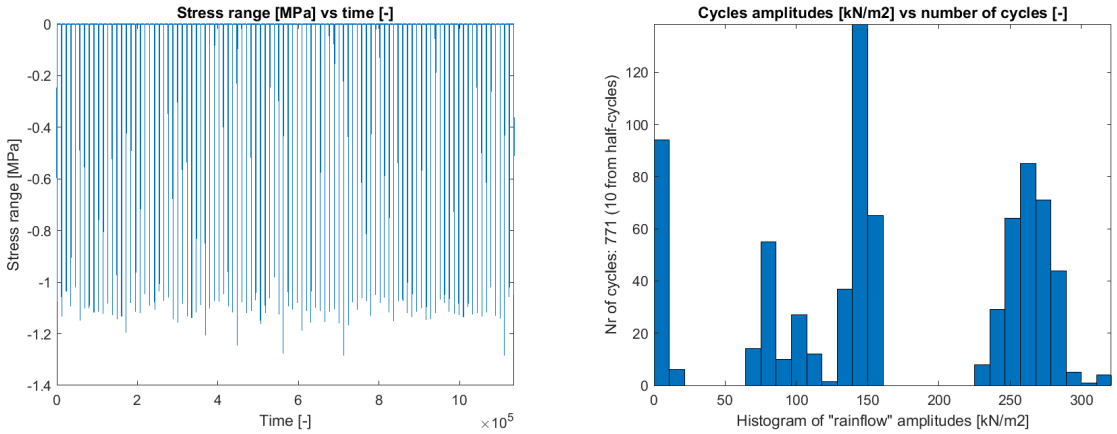


Figure 8.14 – Historique des contraintes (à gauche) et histogramme des cycles (à droite) de la ligne d'influence 1S-MM

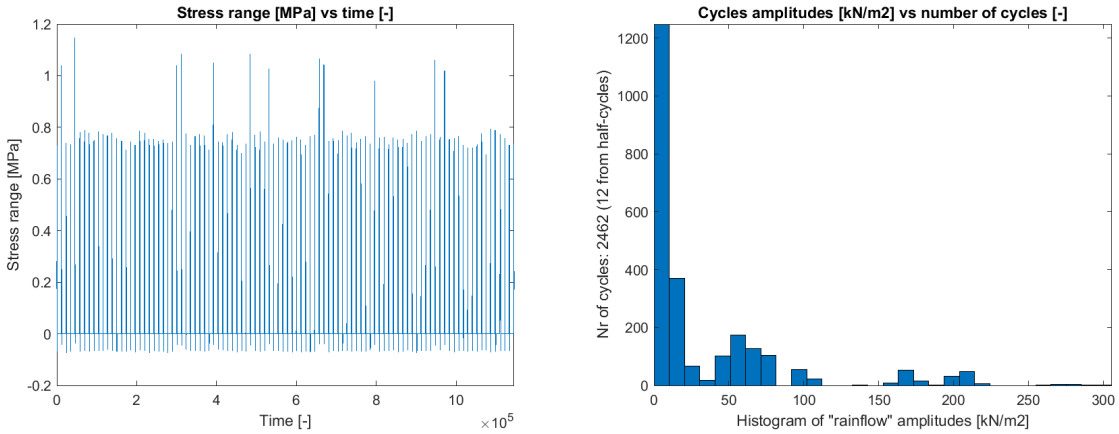


Figure 8.15 – Historique des contraintes (à gauche) et histogramme des cycles (à droite) de la ligne d'influence 3S-SM

8.1.7 100 trains traversant une ligne d'influence de 100 m de portée

Dans ce cas, la grande portée implique des différences de contraintes plus élevées mais un nombre de cycles plus faible, dû à l'effet de plusieurs essieux sur la ligne d'influence en même temps.

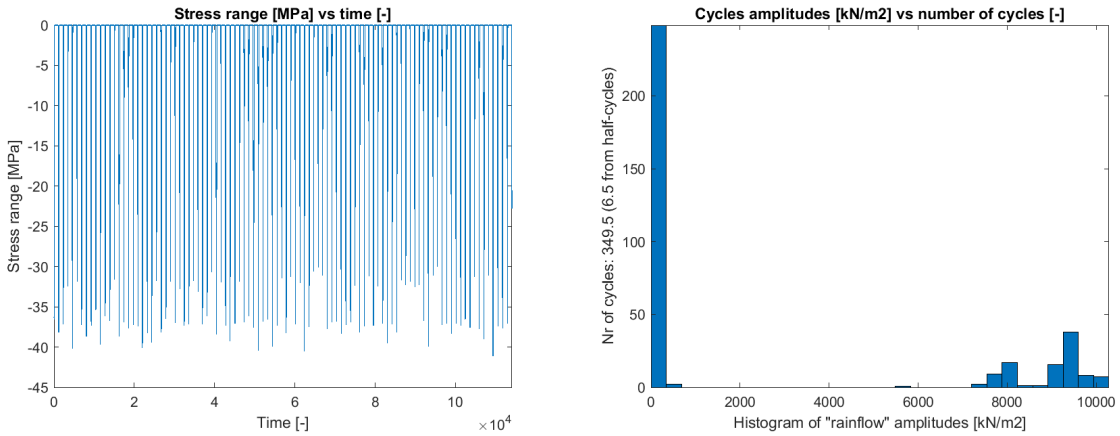


Figure 8.16 – Historique des contraintes (à gauche) et histogramme du cycle (à droite) de la ligne d'influence 1S-MM

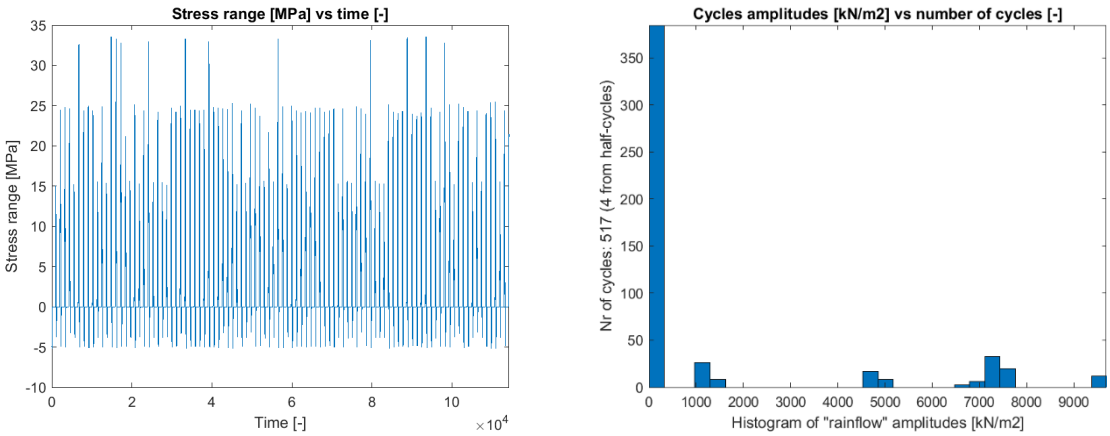


Figure 8.17 – Historique des contraintes (à gauche) et histogramme des cycles (à droite) de la ligne d'influence 3S-SM

8.1.8 10'000 trains traversant une ligne d'influence de 10 m de portée

Dans ce dernier cas, on peut observer un nombre très élevé de cycles car chaque groupe d'essieux génère un ou plusieurs cycles.

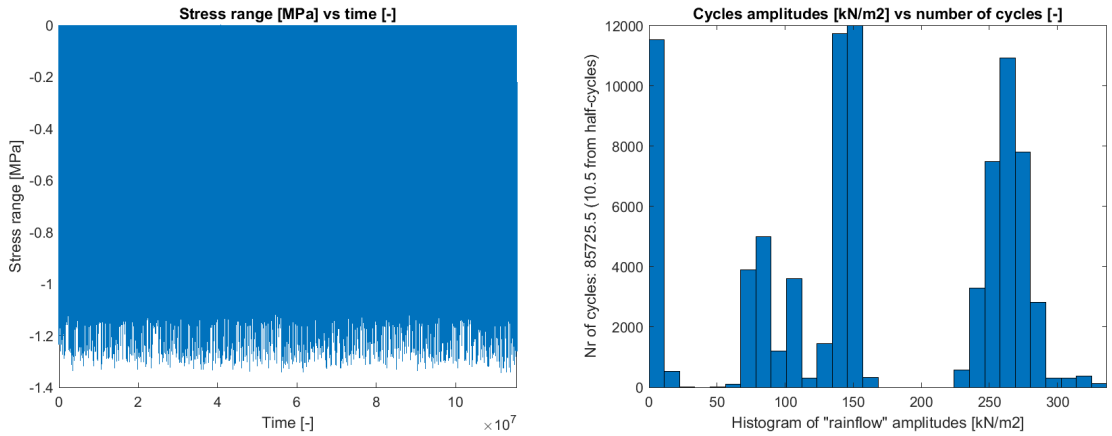


Figure 8.18 – Historique des contraintes (à gauche) et histogramme des cycles (à droite) de la ligne d'influence 1S-MM

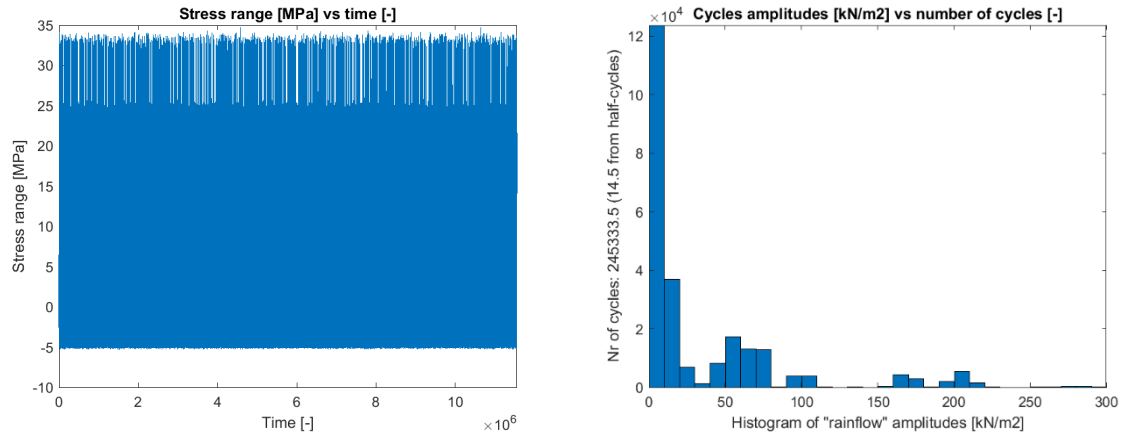


Figure 8.19 – Historique des contraintes (à gauche) et histogramme des cycles (à droite) de la ligne d'influence 3S-SM

8.1.9 10'000 trains traversant une ligne d'influence de 100 m de portée

Dans ce cas, la grande portée implique des différences de contraintes plus élevées mais un nombre de cycles plus faible, dû à l'effet de plusieurs essieux sur la ligne d'influence en même temps.

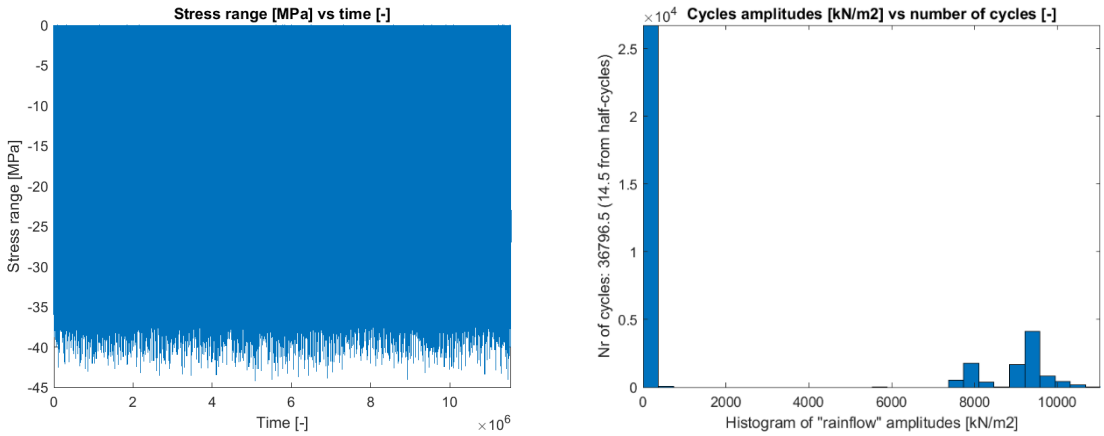


Figure 8.20 – Historique des contraintes (à gauche) et histogramme des cycles (à droite) de la ligne d'influence 1S-MM

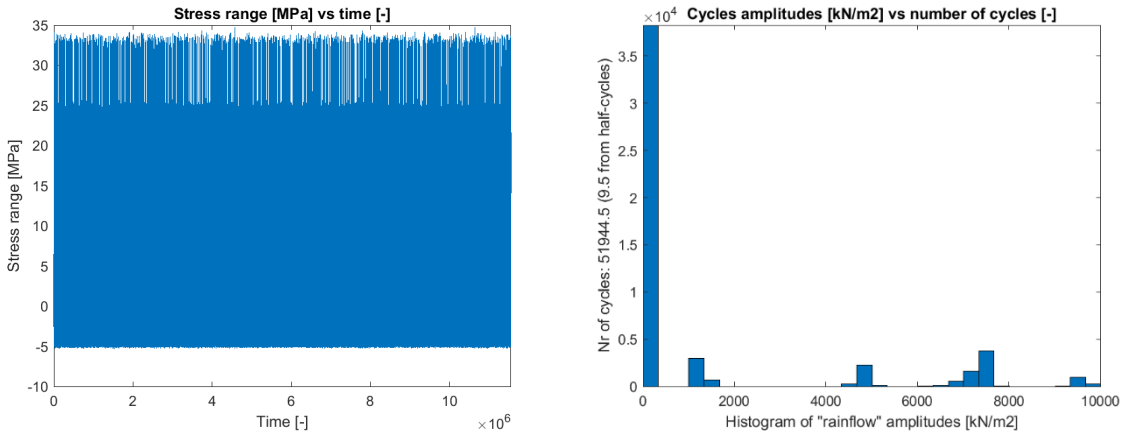


Figure 8.21 – Historique des contraintes (à gauche) et histogramme des cycles (à droite) de la ligne d'influence 3S-SM

8.1.10 Considérations finales

Dans cet exemple, on a montré comment le passage d'un ou plusieurs trains génère un historique des contraintes et l'histogramme des cycles correspondant. Ces résultats peuvent être utiles pour mieux comprendre les résultats des simulations ; il faut toutefois dire que le facteur partiel λ_1 ne dépend pas uniquement de la différence de contrainte équivalente générée par le trafic réel simulé $\Delta\sigma_{E2,}$ mais aussi de la différence de contrainte généré par le modèle de charge de fatigue $\Delta\sigma(Q_{fat})$. Le facteur est de fait le rapport entre les deux. Il y a aussi l'effet du facteur partiel $1/\lambda_2$ à considérer. Une fois la valeur du facteur partiel λ_1 déterminé pour un cas, elle doit être recalibrée pour correspondre au volume de référence, soit $V_{0,}$ soit Q_{m0} et $N_{0.}$ Il devient donc compliqué de visualiser quel type de train affecte de manière négative la valeur finale du facteur partiel λ_1.

8.2 Analyse de sensibilité sur la géométrie des trains

Comme montré dans le paragraphe précèdent, la géométrie des trains joue un rôle très important dans le nombre et l'amplitude des cycles. Ces variations sont toutefois moins défavorables que celles du trafic routier, parce on n'a pas de grandes variations de géométrie entre les véhicules.

De plus, on ne constate pas de grandes différences de géométries entre les différents constructeurs de trains, et on estime que cette tendance va continuer dans les prochaines années, dans un secteur largement standardisé.

On montre dans les paragraphes suivants un exemple de calcul en faisant varier la géométrie des trains de manière extrême et irréaliste, pour avoir une sensibilité sur le dommage causé par ces trains.

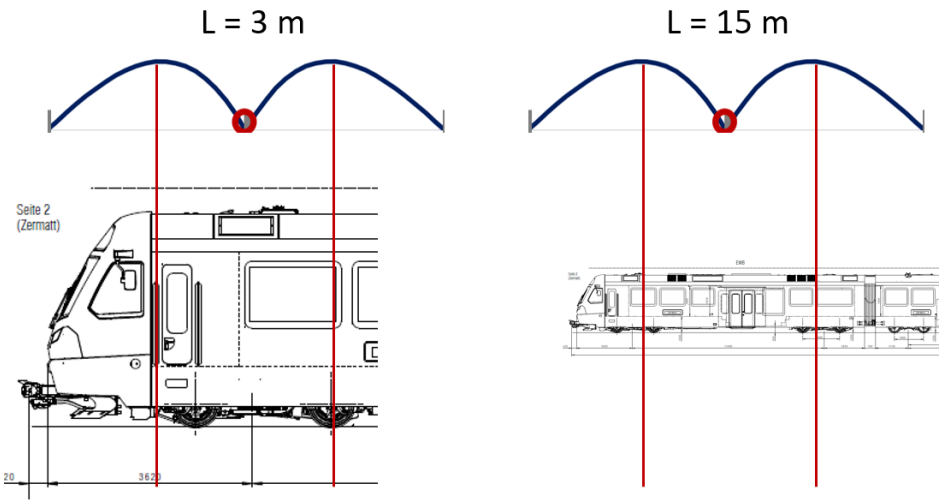


Figure 8.22 – Passage du train sur des portées de longueur différent

Dans la figure précédente, on voit comme chaque essieu peut générer un ou plus cycles, dans le cas de portées très petites. Au contraire, pour les grandes portées, les essieux travaillent plutôt en groupes, avec un nombre des cycles inférieur mais avec une amplitude plus élevée dans le cas où les groupes d'essieux tombent en même temps sur les pics de la ligne d'influence.

8.2.1 Exemple de variation des géométries

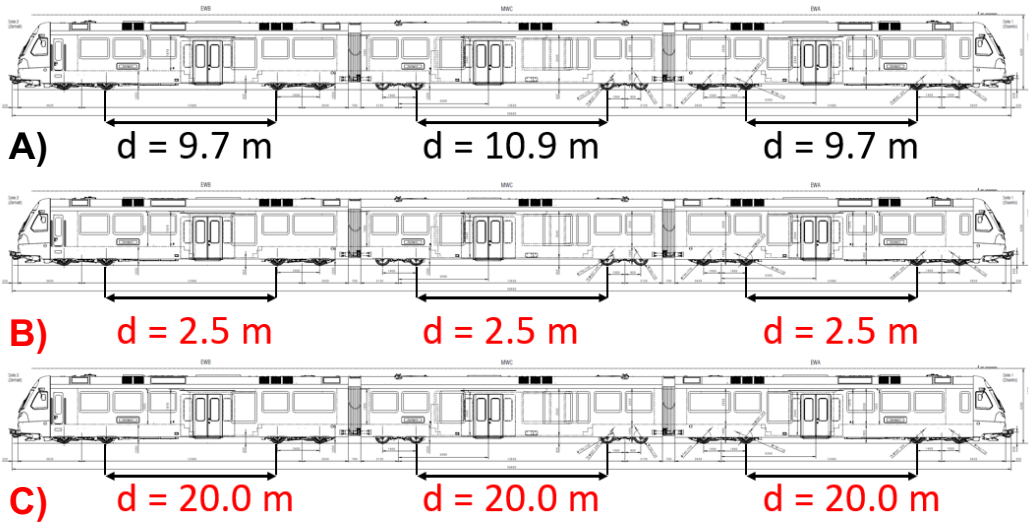


Figure 8.23 – Géométrie utilisé dans l'exemple

Pour cet exemple, on utilise toujours le Regionalverkehr_1 de la Matterhorn Gotthard Bahn sur la ligne Oberwald-Realp qui est composé d'un seul ABeh 8/12 "Orion". On le modifie avec 3 types de distances entres les groupes d'essieux principaux : l'original avec des distances de 9.7 m et 10.9 m ; un train court avec une distance de 2.5 m et enfin un train allongé avec 20 m de distance entre les groupes d'essieux principalaux.

Ces trois trains seront utilisés pour faire des simulations avec 1000 trains sur les lignes d'influence 1S-MM (portée simple, moment fléchissant en travée) et 2S-SM (portée double, moment fléchissant sur appuis) en combinant une longueur de portée de 2 m ou de 20 m. Il faut souligner que les trains ont le même poids par essieu, le volume total des trains ne change pas, on a uniquement une variation de géométrie.

8.2.2 Résultats

Le tableau suivant montre les résultats obtenus pour le facteur partiel λ_1 et le nombre des cycles.

Tableau 8.1 –Calcul du coefficient dynamique, situation actuelle et proposition

Train	1S-MM 2 m	1S-MM 20 m	2S-SM 2 m	2S-SM 20 m
 A) d = 9.7 m d = 10.9 m	λ_1=1,66 12'000 cycles	λ_1=0,65 4'608 cycles	λ_1=1,25 17'998 cycles	λ_1=0,70 6'993 cycles
 B) d = 2.5 m d = 2.5 m	λ_1=1,66 12'000 cycles	λ_1=0,93 3'316 cycles	λ_1=1,30 14'998 cycles	λ_1=1,01 3'824 cycles
 C) d = 20.0 m d = 20.0 m	λ_1=1,66 12'000 cycles	λ_1=0,79 4'000 cycles	λ_1=1,25 17'998 cycles	λ_1=0,53 8'994 cycles

On obtient les résultats suivants:

- Pour les cas 1S-MM / 2 m, les trois types de trains génèrent 12'000 cycles, ce qui correspond à un cycle par essieu (12 essieux · 1'000 trains). La portée est tellement petite que la variation de longueur entre les axes n'affecte pas les résultats ;
- Le cas 1S-MM / 20 m et le type de train C génèrent 4'000 cycles, ce qui correspond à un cycle par groupe d'essieux (4 groupes· 1'000 trains). La portée est tellement grande que les essieux d'un même groupe agissent comme un essieu unique;
- On remarque aussi cet effet pour le cas 2S-SM / 2 m, dont les trains de type A et C ont le même nombre de cycles, mais pas pour le train B, parce la distance de 2,5 m est inférieure à la longueur totale de la ligne d'influence (2 portées · 2 m). Pour ce dernier cas, le nombre de cycles diminue de 17'998 à 14'998. Le coefficient λ_1 augmente de 1,25 à 1,30, on peut donc dire que ces 14'998 cycles auront une amplitude plus grande ce qui est défavorable pour la fatigue ;
- Pour tous les cas, en augmentant la portée, le nombre de cycles et le facteur partiel λ_1 diminuent, mais de manière différente pour chaque géométrie de trains ou système statique ;

- Pour le cas 2S-SM / 20 m avec le train type C, on obtient environ le double des cycles du cas 1S-MM / 20 m, ceci est dû aux deux bosses de la ligne influence ;

8.2.3 Considérations finales

Dans cet exemple, tous les trains ont la même charge totale, seule la géométrie change. On peut donc conclure que :

- Avoir des essieux plus proches réduit le nombre de cycles mais augmente leur amplitude
- Avoir des portées plus grandes réduit le nombre de cycles, et ce même si leur amplitude va augmenter (elle augmente aussi dans le modèle de charge, mais ceci ne compense pas l'effet d'avoir moins de cycles), donc la valeur λ_1 va diminuer
- Seuls 4 cas ont été présentés, il y a d'autres configurations où l'effet de la géométrie peut affecter plus ou moins les résultats. En plus, il n'y a pas en général de cas extrêmes comme ceux montrés dans l'exemple, mais plutôt des trains qui variant légèrement dans les géométries et pourcentages.
- Les deux lignes d'influences montrées sont aussi deux des lignes d'influences extrêmes. Dans le calcul final de λ_1, on utilisera 54 lignes d'influences et 40 portées. Les lignes d'influences seront donc différentes selon les portées.

9 Validation des algorithmes

Ce chapitre détaille la méthodologie utilisée pour valider les nouveaux algorithmes pour le calcul de λ_1 et λ_{max}. L'algorithme a été validé en simulant et en comparant les résultats des simulations avec différents cas qui ont été publiés dans le passé. Il est important de noter que chaque auteur des simulations précédentes a fait des hypothèses distinctes, qui étaient dans certain cas difficiles à modéliser ou qui manquaient d'informations. Dans ce paragraphe, on se limite à montrer la validation faite avec les courbes λ_1 de la norme EN 1993-2 pour le trafic ferroviaire à voie standard.

Dans cette validation, les valeurs λ_1 pour le trafic ferroviaire ont été recalculées/validées en utilisant la combinaison de trafic EN 1993-2 comme trafic réel et l'UIC 71 comme modèle de charge de fatigue. Les mêmes algorithmes et la même méthode que pour le trafic routier ont été utilisés et adaptés [40], la procédure pour le calcul de λ_1 est toujours la même comme indiqué dans la Figure 9.1. Le contexte des valeurs lambda pour les ponts ferroviaires peut être trouvé dans [12].

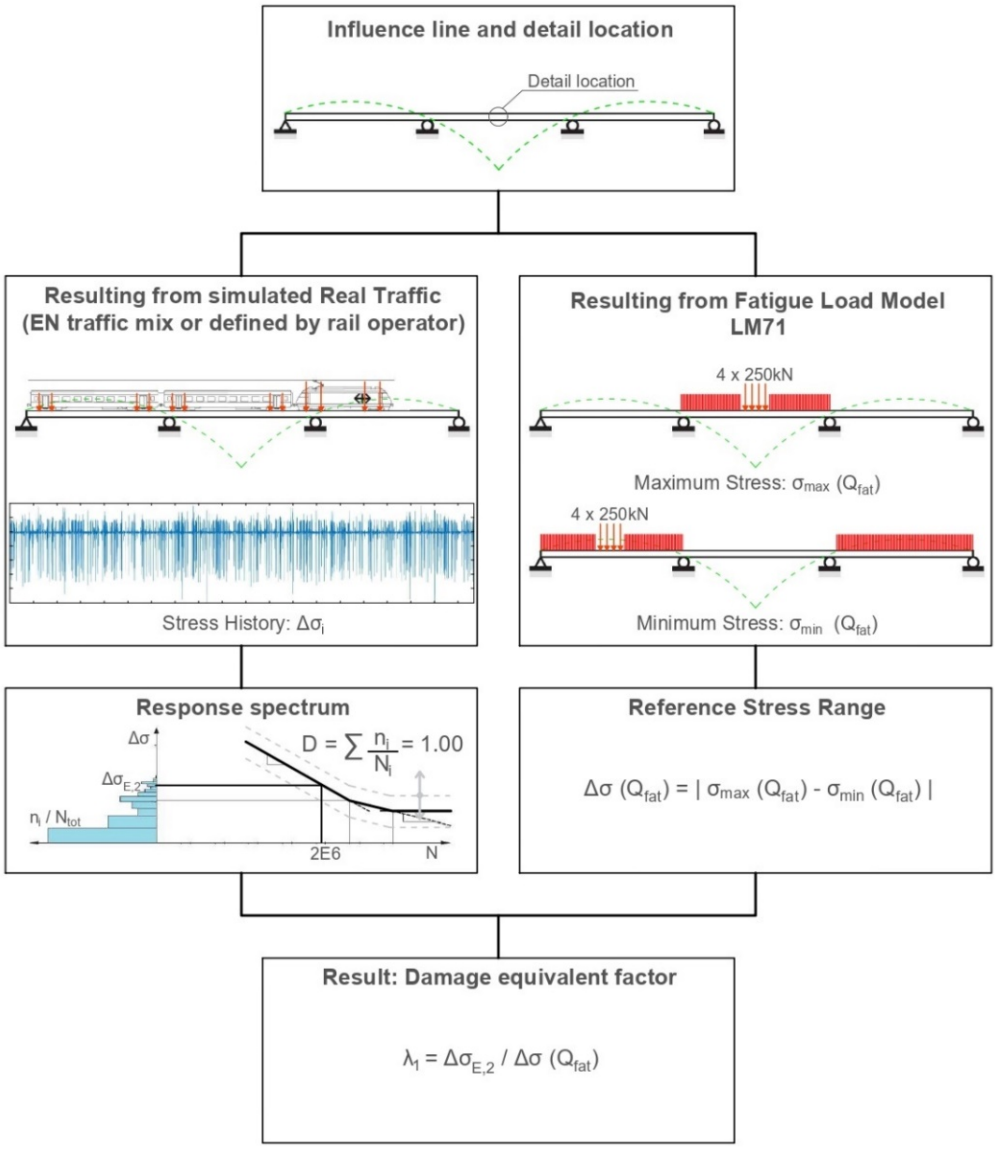


Figure 9.1 – Étapes de l'algorithme pour obtenir le facteur partiel λ_1 correspondant pour le trafic ferroviaire

La validation a été effectuée en exécutant les simulations avec un trafic qui permet d'avoir les facteurs λ_2, λ_3 and λ_4 égal à 1,00. Ainsi, on n'affecte pas les résultats par des erreurs provenant de l'application de ces facteurs partiels ($V_{obs}=V_0=25$ Mio tonnes/an, $T_{ref}=T_0=100$ ans, et une seule voie de circulation).

Les valeurs λ_1 obtenues sont comparées aux valeurs de la norme EN 1993-2, indiquées dans la Figure 9.2. La courbe simulée correspond de manière très précise à la courbe de la norme actuelle en utilisant le système statique à deux portées et en considérant la ligne d'influence du moment de flexion sur appui (2S-SM). La bonne corrélation est aussi obtenue grâce à la plus faible variation des combinaisons de trafic ferroviaire par rapport au trafic routier (qui comporte différents véhicules et combinaisons de véhicules sur chaque ligne d'influence).

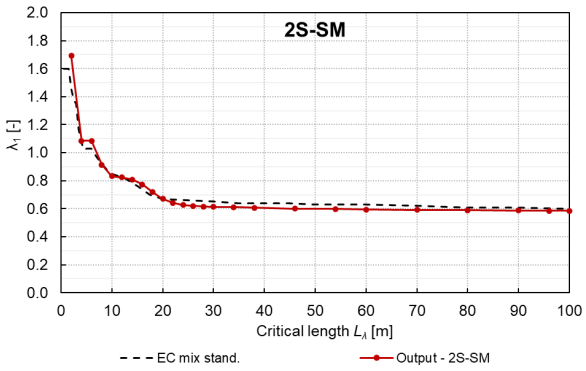


Figure 9.2 – Comparaison entre la courbe λ_1 de la norme EN 1993-2:2006 pour les ponts ferroviaires et les simulations (en rouge)

La figure suivante montre que les courbes λ_1 actuelles de l'Eurocode pour les ponts ferroviaires à écartement standard ne sont pas trop éloignées des résultats des simulations obtenues par l'EPFL, et qu'elles peuvent être considérées comme correctes aussi pour les autres types de trafic.

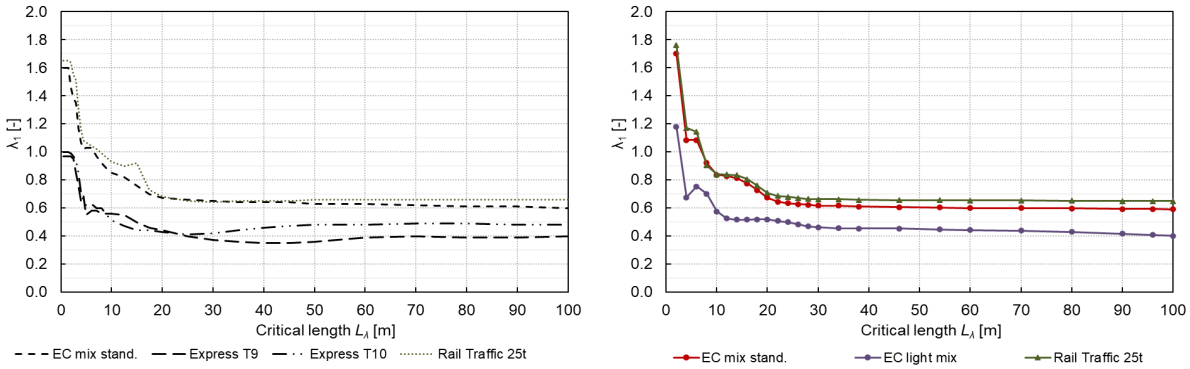


Figure 9.3 – Comparaisons des courbes de l'EN 1993-2 (à gauche) avec les simulations EPFL des catégories de trafic de l'EN 1991-2 (à droite)

La validation a été effectuée également pour d'autres cas d'étude ou courbes des normes qui ne sont pas décrit dans cette étude, en particulier :

- Trafic routier, courbe λ_1 de la norme EN 1993-2 définie par Sedlacek et Merzenich, 1995 ;
- Trafic routier, courbe λ_{max} de la norme EN 1993-2 définie par Sedlacek et Merzenich, 1995 ;
- Trafic routier, courbe λ_1 de la norme SIA 261:2013 ;
- Trafic routier, courbe λ_1 modifiée proposée par J. Maljaars, 2020 ;
- Trafic routier Bliesheim (DE), calcul histogramme des cycles par M. Sjaarda, 2022;

Pour plus d'informations, faire référence à l'étude effectuée par l'EPFL comme background de la nouvelle version de la norme prEN 1993-2:2022 [40].

Les nombreuses validations et le grand développement de l'algorithme dans les 4 dernières années représentent le point clé de ce travail. En effet, suivant la méthode de calcul manuelle utilisée à l'époque, il aurait fallu des années pour obtenir la même quantité de résultats.

9.1 Corrélation entre le facteur partiel λ_1 des voies standard et voies étroites

La pertinence des courbes du trafic ferroviaire à voie étroite peut être vérifiée en le mettant en relation avec les courbes du trafic ferroviaire à voie normale.

En supposant que les courbes actuelles λ_1 pour le trafic ferroviaire à voie normale de la norme SIA 261 et de la norme EN 1993-2 sont correctes (voir paragraphe 8), les simulations de l'EPFL données à la Figure 9.4 pour le moment de flexion à mi-portée d'une seule travée (1S-MM) et le moment de flexion à l'appui d'une double travée (2S-SM) montrent qu'il est possible de corréler ces courbes à celle du trafic ferroviaire à voie étroite.

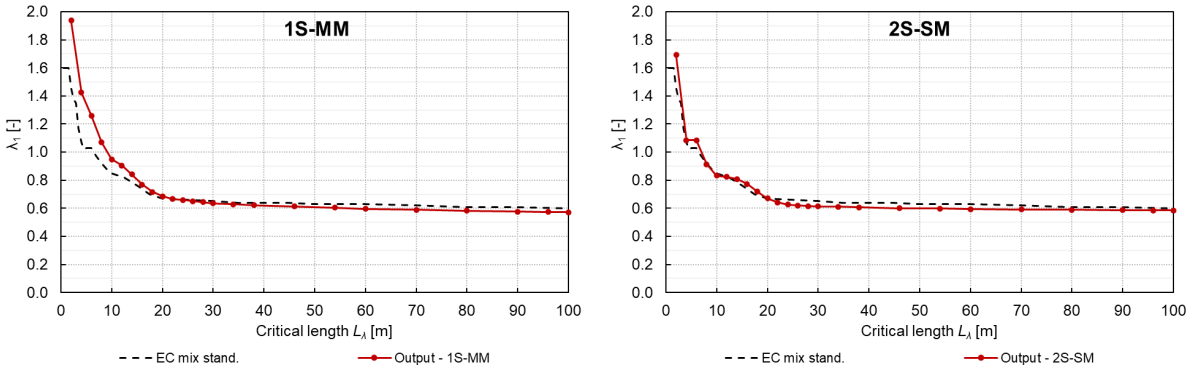


Figure 9.4 – Comparaison entre la courbe λ_1 de la norme EN 1993-2:2006 pour les ponts ferroviaires à écartement standard et les simulations (en rouge).

Trafic ferroviaire à voie standard : Il est recommandé d'étudier plus en détail le comportement des courbes, car celles-ci ont été obtenues pour un nombre limité de lignes d'influence et il peut y avoir quelques lignes d'influence critiques qui peuvent conduire à des valeurs λ_1 plus élevées. En plus on voit que la courbe n'a pas des marges considérant la fiabilité de l'utilisation d'un nombre réduit de lignes d'influences et combinaisons des trafics ferroviaires.

Les simulations effectuées par l'EPFL calculent le facteur λ_1 du trafic ferroviaire à écartement normal en utilisant exactement le même trafic (standard mix avec des essieux ≤ 22,5 t décrit dans la norme EN 1991-2) et le modèle de charge 1, selon la norme actuelle.

Les courbes λ_1 sont obtenues essentiellement avec l'inverse de la formule (2.3), calculée avec un trafic de 25 millions de tonnes/an, une durée de vie de 100 ans et une seule voie (en obtenant donc que λ_2 =1,00, λ_3 =1,00, λ_4 =1,00) :

$$\lambda_1 = \frac{\Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma(Q_{fat})}$$

Par exemple, pour un moment à mi-portée d'une seule travée avec une longueur déterminante L_λ égale à 30 m, on obtient ces valeurs, tirées de la Figure 9.4 :

$\lambda_{1,\,EPFL}$ = 0,64 [-] $\lambda_{1,\,SIA\ 261}$ = 0,65 [-]

La différence est très faible, d'environ +1,5%.

Pour le calcul avec le trafic ferroviaire à voie étroite, un exemple avec un trafic d'agglomération de 250 trains/jour est réalisé. La procédure est exactement la même : dans les simulations de l'EPFL, le modèle de charge 1 a été remplacé par le modèle de charge 4, le volume de trafic de 25 Mio tonnes/an par 10,6 Mio tonnes/an (afin d'avoir λ_2 =1,00) et le « standard traffic mix with axles ≤ 22,5 t » décrit dans la norme EN 1991-2 par le « MGB Zermatt-Täsch-Visp 2019 ». Pour le facteur λ_1 de la norme SIA, la valeur est directement tirée du graphique de la figure 26 de la SIA 261. Ces valeurs correspondent à :

$$\lambda_{1,\,EPFL} = 0{,}91\ [-] \qquad \lambda_{1,\,SIA\ 261} = 0{,}83\ [-]$$

La différence est très élevée, d'environ -9,6%.

Les simulations de l'EPFL ont montré qu'en changeant le modèle de charge, le type de trafic et le volume des paramètres de la voie normale, utilisant à la place ceux de la voie étroite, le facteur λ_1 augmente de 42% ($\lambda_{1,\,EPFL,\,voie\ étroite}$ / $\lambda_{1,\,EPFL,\,voie\ normale}$) ; la valeur actuelle de SIA n'augmente que de 28% ($\lambda_{1,\,SIA\ ,\,voie\ étroite}$ / $\lambda_{1,\,SIA\ ,\,voie\ normale}$). Ceci est seulement un exemple simulant le "MGB Zermatt-Täsch-Visp 2019", les paragraphes suivants montrent qu'il ne s'agit même pas du type de trafic ferroviaire à voie étroite le plus agressif et que l'écart entre les simulations de l'EPFL et la norme SIA est probablement plus élevé. Cette comparaison souligne comment les types de trains et les géométries utilisés pour la définition des courbes λ_1 actuelles du trafic ferroviaire à voie étroite de la SIA 261 ne sont pas conservateurs et ont conduit à des valeurs inférieures à la composition réelle des trains.

Pour cette raison, compte tenu de l'inexactitude des courbes actuelles du trafic ferroviaire à voie étroite, elles ne sont pas comparables avec les nouvelles courbes λ_1 que l'EPFL va proposer et ces dernières seront plutôt comparées (uniquement pour valider ultérieurement les résultats) avec celles des ponts ferroviaires à voie normale recalibrées en utilisant un modèle de charge de fatigue 5 au lieu d'un modèle de charge de fatigue 1 :

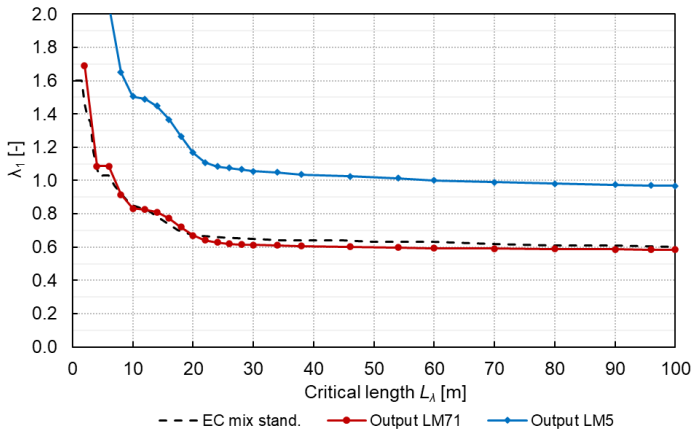


Figure 9.5 – Comparaison entre la courbe λ_1 de la norme EN 1993-2:2006 pour les ponts ferroviaires à écartement normal calculé avec LM71 (en rouge) et LM5 (en bleu).

Cette approche permet de définir clairement comment les géométries des chemins de fer à voie étroite et le poids des essieux affectent les valeurs λ_1 d'une manière différente que les chemins de fer à voie normale, qui dans ce cas sont générés avec le même modèle de charge de fatigue. Enfin, la courbe a également été calibrée sur le volume de 12 Mio/tonnes par an comme la référence qui sera utilisée dans le calcul du facteur λ_2 du calcul pour le trafic ferroviaire à voie étroite :

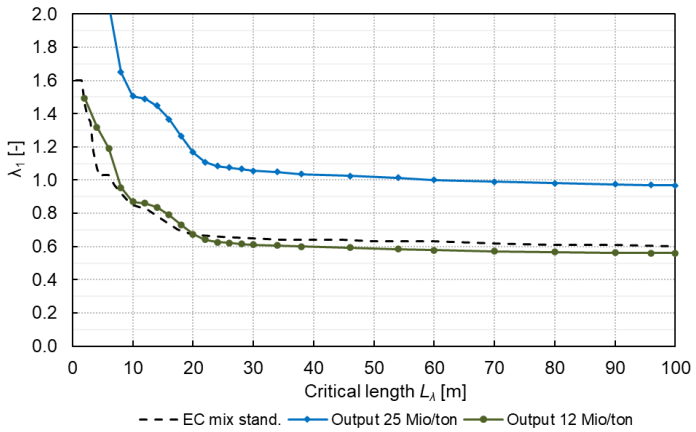


Figure 9.6 – Comparaison entre la courbe λ_1 de la norme EN 1993-2:2006 pour les ponts ferroviaires à écartement standard utilisant LM5 calibré avec 25 Mio/tonnes (en bleu) par an et 12 Mio/tonnes par an (en vert)

La translation a été faite en appliquant la formule complète qui considère le poids moyen de l'essieu Q_m et le nombre d'essieux N_{obs}. Le comportement de la courbe est similaire à la courbe originale pour le « Standard Traffic Mix », LM71 et 25 Mio/tonnes par an car les géométries des trains sont les mêmes. L'utilisation d'un LM5 au lieu du LM71 conduit à une augmentation des valeurs λ_1 qui est compensée par une diminution due à l'application de $1/\lambda_2$ qui considère le volume du trafic plus bas (12 Mio ton/an au lieu de 25).

10 Réflexions par rapport aux facteurs partiels λ_2 , λ_3, λ_4 et λ_{max}

Ce chapitre détaille l'utilisation des facteurs partiels λ_2 , λ_3, λ_4 et λ_{max}. A part le facteur λ_1, seul le facteur lié au volume du trafic λ_2 sera mis à jour. En effet ce facteur partiel est étroitement lié aux simulations faites pour obtenir le facteur λ_1 il faut donc le calibrer avec les résultats des simulations.

10.1 Facteur partiel λ_2 pour le volume de trafic

Le calcul proposé par l'EPFL est fait pour trois niveaux, dont les courbes sont définies en partant du cas critique. L'application d'une valeur λ_2 égale à l'unité est possible en cas de manque de données sur le type et volume du trafic qui circule sur la voie:

$$\lambda_2 = 1{,}00 \tag{8.1}$$

L'indication de la norme SIA 261, formule 56, d'avoir une valeur toujours plus grande que 1,00 peut être supprimée.

Le deuxième niveau de calcul est le même que la norme actuelle et permet de tenir compte du volume du trafic :

$$\lambda_2 = \left(\frac{V_{obs}}{V_0}\right)^{\frac{1}{m}} \tag{8.2}$$

Où :

- V_{obs} Volume du trafic par année et par voie, fourni par l'exploitant [tonnes/an]
- V_0 Volume du trafic par année et par voie du modèle, égal à 12 Mio tonnes [tonnes/an]
- m pente de la courbe de résistance de la fatigue, égal à 5 [–]

Enfin, le troisième niveau de calcul tient compte du poids moyen par essieu et le nombre d'essieux par an. Cette formule est similaire au calcul pour le trafic routier, dont le volume n'est pas calculé en tonnage total par an mais en fonction du poids du véhicule :

$$\lambda_2 = \frac{Q_{obs}}{Q_0} \cdot \left(\frac{N_{obs}}{N_0}\right)^{\frac{1}{m}} \tag{8.3}$$

Où :

- Q_{obs} Poids moyen par essieu du trafic réel sur l'ouvrage [kN]
- Q_0 Poids moyen par essieu du modèle, égal à 120 kN [kN]
- N_{obs} Nombre essieu total du trafic réel sur l'ouvrage [n/année]
- N_0 Nombre essieu total du modèle, égal à 1 Mio [n/année]
- m pente de la courbe de résistance à la fatigue, égal à 5 [–]

Le calcul de Q_{obs} n'est pas une moyenne simple mais est fait selon la formule suivante:

$$Q_{obs} = \left(\frac{\sum n_i {Q_i}^m}{\sum n_i}\right)^{\frac{1}{m}} \tag{8.4}$$

Où :

- Q_i Poids d'essieu [kN]
- n_i nombre d'essieux considérés [–]
- m pente de la courbe de résistance à la fatigue, égal à 5 [–]

La vérification avec un manque de données tend à être conservative. En effet, cette approche est plus logique par rapport à la norme actuelle, où le manque de données peut conduire à un calcul faux. Le trafic de 12 Mio tonnes/an ou 120 kN · 1'000'000 d'essieux par an représente la borne supérieure du trafic à voie étroite suisse, l'utilisation d'un facteur λ_2=1,00 est donc une hypothèse conservatrice.

10.2 Facteur partiel λ_3 pour la durée de service

Le facteur partiel λ_3 considère la vie utile théorique de l'ouvrage et vient la comparer avec la durée d'utilisation standard de 100 ans. La valeur de 100 ans correspond à celle qui a été utilisé pour les simulations du facteur λ_1.

$$\lambda_3 = \left(\frac{T_{Ld}}{T_{ref}}\right)^{\frac{1}{m}} \tag{8.5}$$

Où :

- T_{Ld} vie utile théorique de l'ouvrage [ans]
- T_{ref} vie utile théorique de référence, égale à 100 ans [ans]
- m pente de la courbe de résistance à la fatigue, égal à 5 [–]

Ce facteur partiel n'a pas été mis à jour car il fonctionne déjà correctement, comme démontré dans le document [40]. La durée de vie de l'ouvrage affecte uniquement le nombre de cycles, la formule est donc correcte pour cela. Dans le cas où l'on veut considérer une évolution du trafic au fil du temps, il faudrait calculer le volume moyen du trafic (ou le poids par essieu moyen et le nombre moyen d'essieux par année) et le considérer avec le facteur partiel λ_2. Le facteur λ_3 est uniquement lié à la durée de vie de l'ouvrage.

10.3 Facteur partiel λ_4 pour le trafic sur plusieurs voies

L'algorithme utilisé pour le calcul a été développé pour simuler un trafic à voie unique. Afin de corréler l'effet sur la voie unique la plus chargée avec l'effet des deux voies et de leur croisement, il est fait référence à la formule présentée ci-dessus pour le calcul du facteur partiel λ_4 pour les ponts ferroviaires à deux voies :

$$\lambda_4 = \sqrt[m]{\mathrm{n} + (1 - \mathrm{n}) \cdot \mathrm{a}^m + (1 - a)^m} \tag{8.6}$$

Où :

- n Pourcentage de trafic qui roule au même temps sur les deux voies [%]
- m pente de la courbe de résistance à la fatigue, égal à 5 [–]

et le facteur *a* se calcule ainsi :

$$\mathrm{a} = \frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2} \tag{8.7}$$

Où :

- $\Delta\sigma_1$ Différence de contraintes maximale du détail dans le détail considéré avec le modèle de charge de fatigue. Le chargement sera placé soit sur la voie de gauche, soit sur celle de droite, de manière que : $\Delta\sigma_1 \geq \Delta\sigma_2$ [MPa]
- $\Delta\sigma_2$ Différence de contraintes dans le même détail avec le modèle de charge de fatigue sur la voie opposée [MPa]

La norme SIA propose sous forme de tableau le calcul de ce facteur avec une pourcentage de croisement de 12%, cette valeur représente la borne supérieure du calcul.

$\Delta\sigma_1/(\Delta\sigma_1+\Delta\sigma_2)$	1,00	0,90	0,8	0,70	0,60	0,50
λ_4 (12% de croisements, m = 5)	1,00	0,91	0,84	0,77	0,72	0,71

Figure 10.1 – Calcul du facteur partiel λ_4 pour un pourcentage de croisement de 12% (extraite [44]).

Aussi pour ce facteur le calcul est très simple. Dans ce cas, le calcul est concentré sur l'amplitude du cycle (différence de contrainte), à la différence du calcul du facteur partiel λ_3 où le nombre des cycles était considéré. Le calcul de la norme part du fait que le modèle de charge est appliqué sur deux voies et que la différence de contrainte $\Delta\sigma(Q_{fat})$ est réduite en fonction des cycles sur les deux voies.

On fait la validation à partir de cet exemple :

Données de base: $\Delta\sigma_2 = 0{,}65 \cdot \Delta\sigma_1$

$\Delta\sigma_{,croisement} = \Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2 = 1{,}65 \cdot \Delta\sigma_1$

$$\rightarrow a = \frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\sigma_1+\Delta\sigma_2} = \frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\sigma_1+0{,}65\cdot\Delta\sigma_1} = \frac{1}{1{,}65} = 0{,}60$$

$$\lambda_4 = \sqrt[m]{n + (1-n)\cdot a^m + (1-a)^m} = \sqrt[5]{12 + (1-12)\cdot 0{,}60^5 + (1-0{,}60)^5} = 0{,}72$$

On peut le valider en faisant le calcul inverse, en partant d'une seule voie chargée pour calculer le $\Delta\sigma(Q_{fat})$ et en appliquant la formule inverse:

$\mathbf{\Delta\sigma_{tot}} = (12\% \cdot (\Delta\sigma_{,croisement})^5 + 88\% \cdot (\Delta\sigma_1)^5 + 88\% \cdot (\Delta\sigma_2)^5)^{1/5}$

$= (12\% \cdot (1{,}65 \cdot \Delta\sigma_1)^5 + 88\% \cdot (\Delta\sigma_1)^5 + 88\% \cdot (0{,}65 \cdot \Delta\sigma_1)^5)^{1/5}$

$= \mathbf{1{,}19 \cdot \Delta\sigma_1}$

Le facteur partiel λ_4 sera donc de 1,19 si on veut utiliser comme modèle de charge en fatigue le trafic sur une seule voie, en reportant ça sur deux voies, il viendra :

$$\Delta\sigma_{tot} = 1{,}19 \cdot \Delta\sigma_1 = 1{,}19 \cdot \frac{(\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2)}{1{,}65} = 0{,}72 \cdot (\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2)$$

$$\rightarrow \boldsymbol{\lambda_4 = 0{,}72}$$

Le calcul du facteur partiel λ_4 fonctionne donc et donne la valeur de différence de contraintes moyenne avec le nombre des croisements et la différence des contraintes sur les deux voies.

10.4 Facteur λ_{max} comme limite supérieure

Le facteur λ_{max} représente la limite supérieure du facteur global d'équivalence de dommage. Il est égal à 1.4 pour le trafic ferroviaire à voie étroite.

Cette valeur a été retenue car il s'agit simplement du rapport entre la limite de résistance à la fatigue $\Delta\sigma_C$ et la limite de fatigue sous amplitude constante $\Delta\sigma_D$.

$$\lambda_{\max} = \sqrt[m]{\frac{N_{\Delta\sigma D}}{N_{\Delta\sigma C}}} = \sqrt[3]{\frac{5 \cdot 10^6}{2 \cdot 10^6}} = 1{,}357 \rightarrow 1{,}40$$

Au final, cela veut dire qu'en appliquant un facteur λ_{max}=1,40, on se situe dans un ordre de grandeur de la résistance à la fatigue qui permet d'avoir les cycles au-dessous de la limite de fatigue sous amplitude constante $\Delta\sigma_D$. La vie de l'ouvrage tend vers l'infini.

10.5 Considérations finales sur l'application d'autres facteurs partiels λ_i

Les facteurs partiels décrits dans ce paragraphe n'ont pas subi de modifications sauf pour le facteur λ_2, qui a été reformulé en considérant le même principe déjà utilisé et validé pour le trafic routier. En effet, la prise en compte du volume du trafic seul n'est pas correcte de base, parce que le nombre de cycles (et donc des essieux qui provoquent ce cycle) affectent les résultats en manière exponentielle 1/m. Par contre les poids de ces essieux affectent les résultats de manière linéaire.

C'est plutôt logique et en lien avec la courbe de résistance à la fatigue (ou courbe de Wöhler). Si par exemple on double la différence de contrainte moyenne $\Delta\sigma_{E2}$ qui est directement lié au poids moyen par essieu, on va doubler la résistance nécessaire du détail. Cependant si on double le nombre de cycles en augmentant uniquement le nombre d'essieux, il n'est pas nécessaire d'avoir une résistance du détail deux fois plus élevée mais uniquement de 15%, parce l'augmentation correspond à $(2)^{1/5}$.

Etant donné qu'il n'est pas toujours facile et pratique d'obtenir les données des poids moyens par essieu et le nombre d'essieux par an, l'EPFL propose la possibilité d'avoir une vérification sur trois niveaux, en restant du côté conservateur en cas de manque de données, la méthode ayant été calibrée avec la borne supérieure du trafic suisse.

11 Influence de la forme des courbes de résistance

Cette étude et ses simulations sont basées sur des courbes de résistance (ou courbe de Wöhler) de l'acier avec pente m = 3|5. Cette approche est conforme à plusieurs normes suisses et européennes et est conservatrice, car cette courbe représente la courbe critique. Il faut quand même citer les autres cas pour avoir une vision complète du travail qui a été fait. Pour plus des détails et simulations, voir [40].

11.1 Double pente m = 3|5

Les pentes m = 3 et 5 sont utilisées dans les types de détails en acier les plus courants, et elles ont été adoptées pour générer les courbes λ_1. Ce type de pente est également utilisé car il représente la "limite supérieure" ; en effet, la seule pente qui donne des valeurs de λ_1 plus élevées est celle à pente constante m=3, qui n'est utilisé dans aucun détail.

La courbe de fatigue avec m=3|5 est caractérisée par une pente m_1=3 pour $N \leq 5 \cdot 10^6$ cycles, une pente m_2=5 pour $5 \cdot 10^6 < N \leq 100 \cdot 10^6$ cycles et une limite de coupure à $N > 100 \cdot 10^6$ cycles (Figure 11.1).

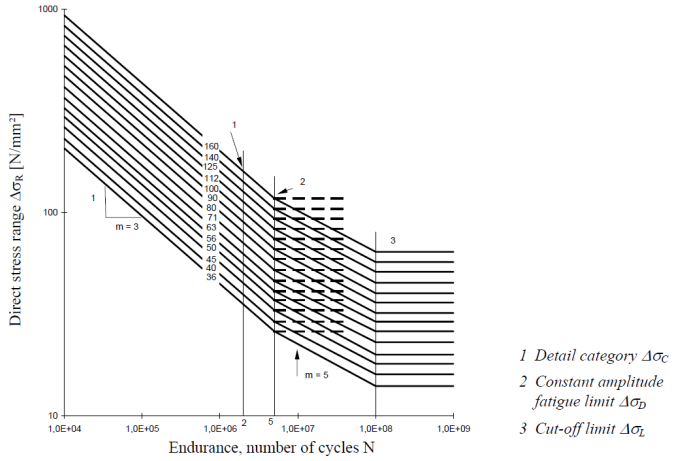


Figure 11.1 – Courbes caractéristiques de résistance à la fatigue des détails en acier de construction selon EN 1993-1-9:2005

11.2 Double pente m = 4|6

En référence à la partie prEN1993-1-11 pour les éléments de tension en acier, la courbe de résistance à la fatigue avec des pentes m = 4|6 est utilisée pour vérifier la différence de contraintes normales des éléments de tension du groupe C. Par exemple, pour les systèmes de torons des ponts à haubans, la courbe de résistance à la fatigue est composée de deux pentes, m_1 = 4 pour $N \leq 2 \cdot 10^6$ cycles et m_2 = 6 pour $N > 2 \cdot 10^6$ cycles, et sans limite de coupure (Figure 11.2).

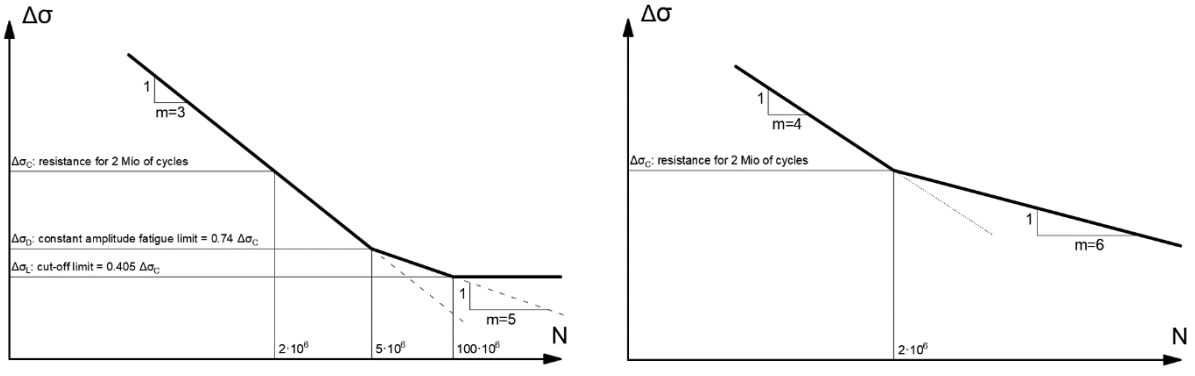


Figure 11.2 – Pentes m=3|5 (à gauche) et m = 4|6 (à droite)

L'utilisation des pentes m=4|6 génère des valeurs plus faibles de λ_1, sauf pour de grandes longueurs déterminantes pas réalistes L_λ > 180 m, des systèmes statiques à travées multiples [40], où l'absence des limites de coupure donne une incidence plus élevée, et les courbes tendent à correspondre aux valeurs de m=3|5. Par conséquent, l'utilisation de la courbe de résistance à la fatigue des dommages "plus agressive" avec des pentes m=3|5 donne des résultats conservateurs.

11.3 Double pente m = 5|9 (barres d'armature)

Cette courbe de résistance à la fatigue est constituée de deux pentes, m_1 = 5 pour N ≤ $2 \cdot 10^6$, m_2 = 9 pour N > $2 \cdot 10^6$ cycles, et sans limite de coupure. Elle est utilisée notamment pour la vérification en fatigue de :

- Barres d'acier d'armature avec des efforts normaux, en référence à la norme prEN1992-1-1 (Figure 11.3) ;
- Éléments plats et certains joints fixés mécaniquement avec des efforts normaux, en référence à la norme prEN1993-1-9:2021.

Table E.1(NDP) — Design parameters for *S-N* curves for carbon reinforcing steel

Type of reinforcing steel	Diameter	$\Delta\sigma_{Rsk}$ 5 %-quantile (Test σ_{max} $0{,}6f_{yk}$)			
		$\Delta\sigma_{Rsk}$ [MPa]	N^*	stress exponent	
				k_{f1}	k_{f2}
Bars (including de-coiled bars)[a]	$\phi \le 12$ mm	160	$2 \cdot 10^6$	5	9
	12 mm < $\phi \le$ 16 mm	140			
	16 mm < $\phi \le$ 20 mm	130			
Straight bars [a,b]	$\phi >$ 20 mm	130			
Tack welded bars[c,d] and welded wire fabrics	$\phi \le$ 12 mm	100		3	5
	$\phi >$ 12 mm	80			
Couplers[e]	–	35	10^7	3	5

[a] Values for bent parts of bars should be obtained using a reduction factor $\xi = 0{,}35 + 0{,}026 \cdot \phi_{mand}/\phi$. The reduction factor ξ may be omitted for shear reinforcement with 90° stirrups $\phi \le 16$ mm and depth $h \ge 600$ mm.
[b] Values for $\Delta\sigma_{Rsk}$ only to be applied for straight bars and not for de-coiled bars.
[c] Values for $\Delta\sigma_{Rsk}$ of tack welded apply for a distance of 5ϕ at each side of the weld.
[d] Values for $\Delta\sigma_{Rsk}$ of tack welded apply only for CO_2-welded bars.
[e] Values for couplers apply unless more accurate *S-N* curves are available based on an European Technical Product Specification.

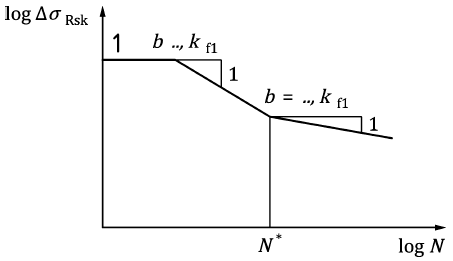


Figure 11.3 – Extract of prEN 1992-1-1:2020 – Design parameters for S-N curves for reinforcing steel

L'utilisation d'une pente m=5|9 génère des valeurs de λ_1 plus faibles que pour m=3|5, sauf pour le cas avec une grande longueur déterminante L_λ des systèmes statiques à travées multiples, où cette courbe tend vers les valeurs du facteur partiel λ_1 calculées avec m=3|5, toujours en raison de l'absence de la limite de fatigue.

11.4 Conclusion sur la pente de la courbe de résistante à la fatigue

La document [40] montre que les valeurs λ_1 pour une courbe de résistance à la fatigue avec m = 3|5 peuvent être généralement acceptées comme étant "du côté de sécurité".

Pour pousser encore plus la méthode il faudrait produire des courbes λ_1 pour m = 3|5 à utiliser de manière exclusive pour les barres d'armature. On n'a pas procédé en cette direction aussi pour maintenir une cohérence de la méthode lambda entre les différentes normes. Il est quand même recommandé pour un calcul de cumul des dommages d'utiliser la courbe de résistance la plus adaptée au cas analysé.

12 Définition de la nouvelle courbe λ_1

Ce chapitre décrit en détail toutes les étapes et la procédure pour obtenir les nouvelles valeurs λ_1. La procédure a été faite avec le **modèle de charge 5** étant donné que les 42 trafics pris en considération rentrent dans cette catégorie ayant au moins un wagon avec 160 kN par essieu.

12.1 Coefficient dynamique Φ_{fat} et longueur déterminante L_λ

Le coefficient dynamique Φ_{fat} a été mis à jour selon le paragraphe 7.5.

En ce qui concerne les règles de la longueur déterminante L_λ, les règles actuelles fonctionnent bien, comme décrit dans le 2.5. Dans les résultats suivants, les règles de calcul de la longueur déterminante sont appliquées (mais à l'inverse par rapport à connaître $\Delta\sigma_{E2}$ pour en déduire λ_1) et il est clair que les courbes des différents systèmes statiques correspondent bien les uns aux autres sans la nécessité de trouver des corrections comme cela a été nécessaire pour les ponts routiers [40].

12.2 Autres paramètres de l'analyse

Afin de compléter l'étude pour une future utilisation, les paramètres d'analyse sont résumés dans la liste suivante :

- **Trafic ferroviaire à voie étroite** : selon les chapitres 7.1 et Annexe D ;
- **Discrétisation des lignes d'influences** : chaque 10 cm pour les portées ≤ 10 m, chaque 1 m pour les portées > 10 m, cette hypothèse permet une précision élevée sans effet sur les courbes λ_1 ;
- **Tolérance de convergence** : Interruptions des itérations de l'algorithme quand le dommage est >0,98 et <1,02 (tolérance ± 2%), cette hypothèse permet une précision élevée sans effet sur les courbes λ_1 ;
- **Nombre de trains simulés** : 10'000. Une analyse de sensibilité en faisant rouler entre 1'000 trains et 1'000'000 trains a montré qu'avec 10'000 trains on arrive déjà à un nombre suffisant de combinaisons pour avoir la convergence des résultats. Ce groupe de 10'000 trains est répété tout au long de la vie utile de la structure ;
- **Variation poids par essieu** : pour faciliter la convergence et couvrir plus cas possibles, le poids par essieu a été varié de manière aléatoire avec une variation ± 10%. Cela n'a aucun effet sur les courbes λ_1 (parce le poids moyen par essieu et le nombre de trains ne varie pas) mais permet d'avoir un histogramme des cycles plus hétérogène et donc d'arriver plus vite à la convergence (0,98<D<1,02).

12.3 Résultats λ_1 brut

La procédure de calcul des valeurs λ_1 décrite précédemment a été utilisée.

Dans une première phase, les valeurs λ_1 ont été divisées en 4 typologies (moment fléchissant à mi-travée, moment fléchissant sur appuis, cisaillement à mi-travée, cisaillement sur appuis) et par type de trafic, pour diviser les résultats en petites parties et contrôler s'il y a des comportements des courbes irréguliers et si les règles de calcul de la longueur déterminante sont efficaces.

On voit ici l'exemple des résultats d'un des 42 types de trafic. Tous les résultats ont été recalibrés avec le facteur $1/\lambda_2$ pour avoir un volume de trafic avec Q_0=120 kN et N_0=1'000'000 essieux/an.

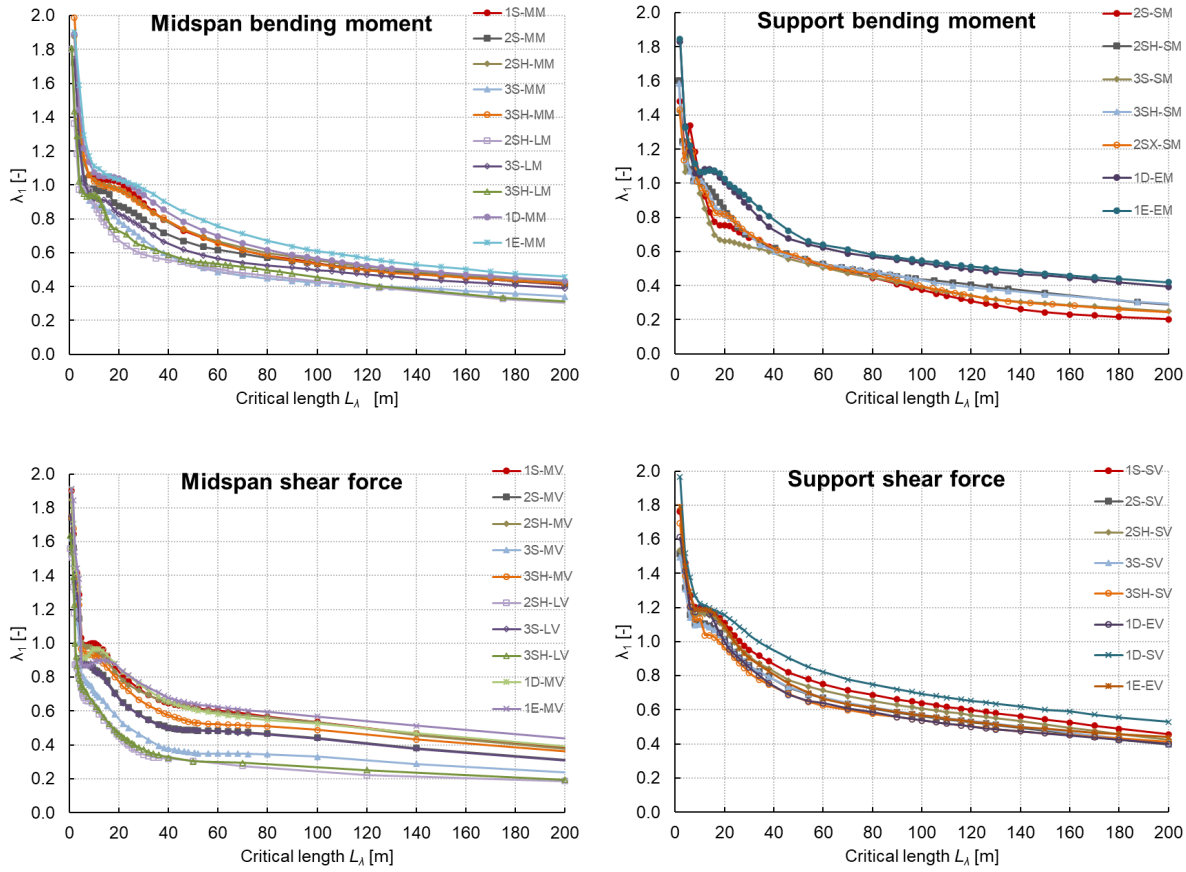


Figure 12.1 –Résultats λ1 brut, RhB : Landquart-Schiers, 2020

Les résultats pour ce cas spécifique montrent qu'il n'est pas nécessaire de diviser les courbes en 4 typologies, parce le comportement est similaire.

12.4 Résultats λ1 interpolé

Une fois les résultats contrôlés, il est possible de procéder avec l'interpolation, pour avoir une valeur de λ1 à chaque mètre. Les valeurs inférieures à 5 m sont effacées, car la dispersion des résultats augmente de manière significative. En plus, pour des portées aussi faibles, l'effet de la rigidité transversale est déterminant pour le calcul. Or la méthode lambda est limitée à la modélisation longitudinale du trafic. Pour cette raison, la méthode n'est pas applicable pour des portées aussi petites.

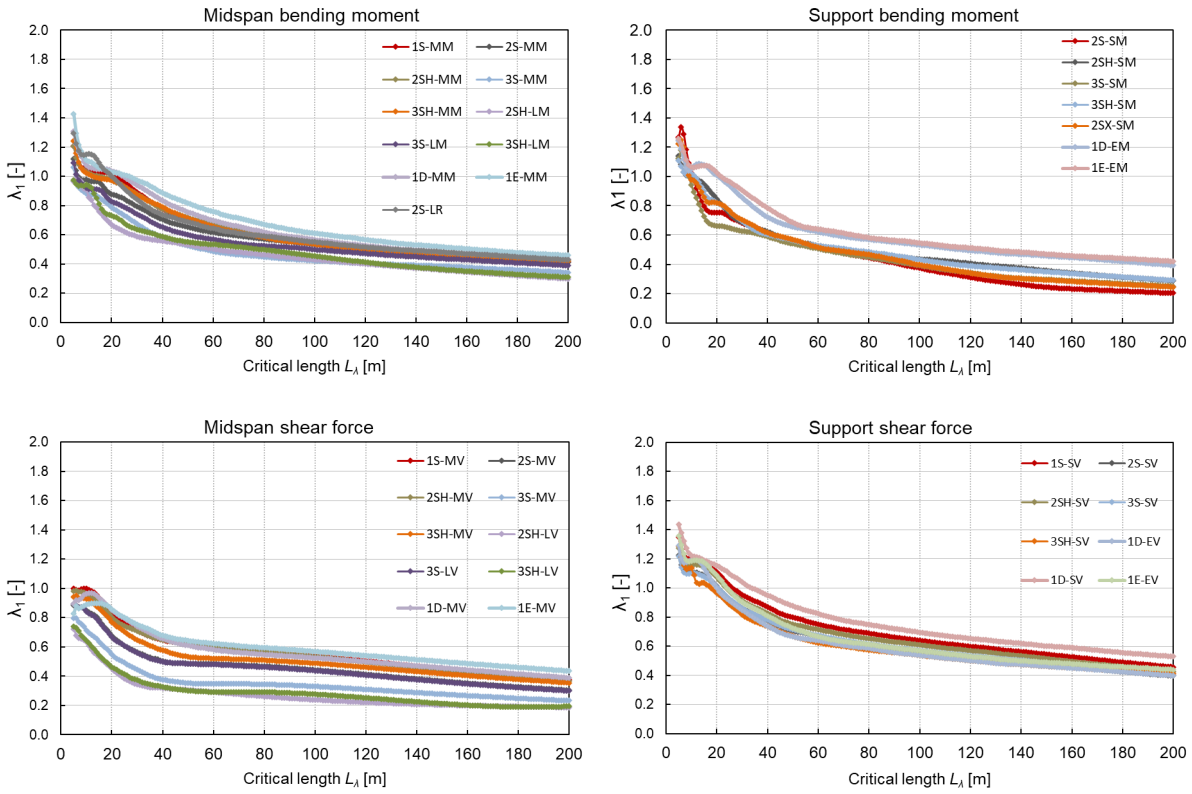
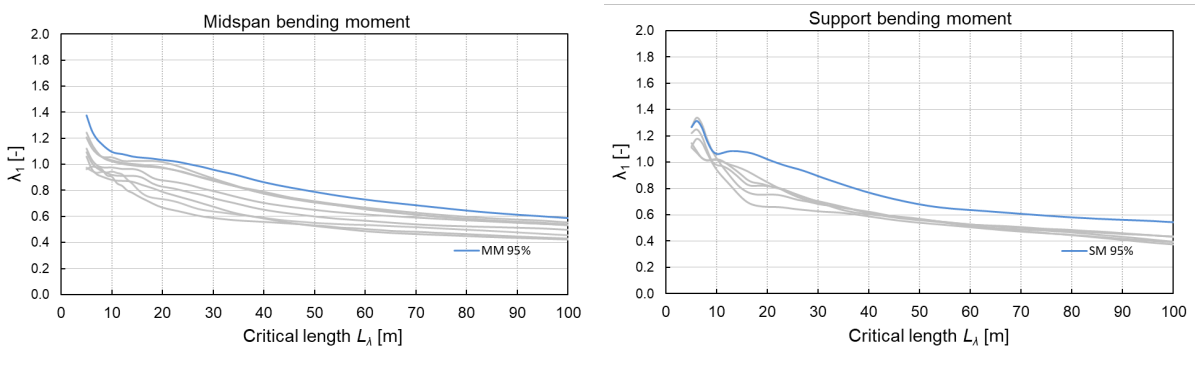


Figure 12.2 –Résultats λ_1 interpolé, RhB : Landquart-Schiers, 2020

Dans la figure suivante on montre, uniquement pour l'exercice, le fractile 95% des 4 groupes de courbes. On voit que la dispersion est élevée et dépend de manière significative du type de ligne d'influence considéré. Les 54 types de ligne d'influence considérés permettent de couvrir la plupart des cas critiques.

En considérant qu'il n'est pas possible de modéliser toutes les lignes d'influence, la méthode propose une grande amélioration. En effet, la littérature montre que les courbes actuelles pour ponts à voie étroite et normale ont été générées avec un nombre très limitées de lignes d'influence.

Il faut considérer aussi que, de l'autre côté, la méthode va être plus conservative, en utilisant une étendue de ligne d'influence plus grande.



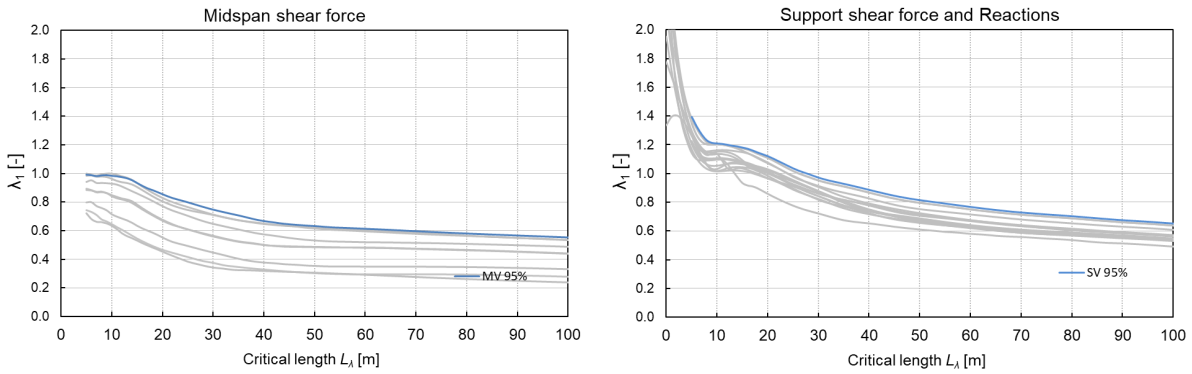


Figure 12.3 –Résultats λ1 fractile 95%, RhB : Landquart-Schiers, 2020

12.5 Résultats λ1 d'ensemble

Les résultats ont montré une grande dispersion, à cause des 42 types de trafic ferroviaire et des 54 lignes d'influence différentes. Comme il n'est pas possible de fournir un nombre élevé de choix entre les différentes lignes d'influence ou les différents trafics, la seule procédure est de mettre ensemble tous les résultats du trafic suisse et de l'utiliser comme une borne supérieure. De cette manière, la méthode reste la plus simple et conservatrice possible. Dans le cas où l'ingénieur désire aller plus en détail, il reste toujours la possibilité d'utiliser la méthode de cumul des dommages.

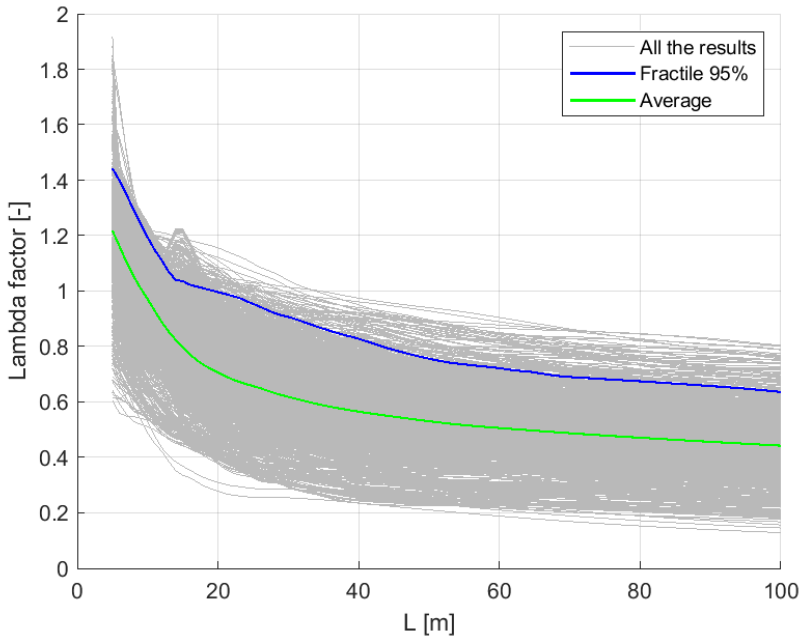


Figure 12.4 –Résultats λ1, ensemble 2'268 courbes

La figure précédente montre l'ensemble des 2'268 courbes (42 types de trafic · 54 lignes d'influence). Chaque courbe possède au moins 40 points de différentes longueurs déterminantes Lλ, ce qui signifie que l'algorithme a calculé environ 90'000 cas. La figure montre aussi la valeur moyenne et le fractile 95% de l'ensemble des courbes.

La Figure 12.4 montre clairement qu'il y a une grande dispersion due au type de trafic et au type de ligne d'influence. Par conséquent, le calcul avec le cumul de dommage ou la création de courbes lambda spécifiques supplémentaires pour différentes lignes d'influence ou différents types de trafic permettent d'importantes optimisations.

12.6 Définition de la courbe et fiabilité

Dans les normes, l'état limite de fatigue (ELU type 4 selon SIA), bien que pouvant dans certains cas conduire directement à l'effondrement, est traité séparément des autres états limites ultimes. Les trois raisons principales expliquant cette séparation sont les suivantes :

i. Les fissures de fatigue peuvent être détectées à temps, même si la structure n'est pas soumise à des inspections spécifiques, à condition que le matériau soit suffisamment résistant. Cependant, dans le cas d'une faible ténacité, la rupture par fatigue se caractérise par un manque de déformation plastique et d'avertissement avant rupture. Pour prévenir ce cas, les normes ont des exigences plus élevées pour les qualités d'acier des éléments de ponts (SIA 263, Annexe A, EN1993-1-10).
ii. La fatigue concerne les détails (tels que les assemblages) plutôt que les éléments. Une structure peut contenir une grande quantité de détails.
iii. Alors que d'autres états limites sont généralement atteints sous des cas de charges extrêmes, i.e. très faible probabilité d'occurrence, l'état limite de fatigue peut être atteint à des niveaux de charge tout à fait ordinaires, fréquents, donc qui peuvent se produire à différents instants au cours de la vie d'un ouvrage.

Étant donné ces deux dernières raisons, combinées à la grande dispersion de la résistance à la fatigue des détails, la corrélation entre événements de rupture par fatigue à différents détails est plus faible que pour d'autres états limites ultimes. Les différences entre l'ELU de type 4 et les autres ELU pourraient être prises en compte en exigeant un indice de fiabilité cible différent pour la fatigue et pour les autres états limites ultimes. De plus, pour fixer le niveau de fiabilité cible en fatigue, deux aspects supplémentaires devraient être pris en compte : le fait qu'il y a une certaine corrélation dans le temps des évènements en cas de dégradation par fatigue, la différentiation entre structures conçues pour être inspectées et celles qui ne le sont pas (et/ou difficiles à réparer). S'il y a une certaine logique conservatrice à demander les mêmes indices de fiabilité cible que pour les autres états limites ultimes dans le cas de structures non-inspectées/inspectables, ces valeurs peuvent être réduites dans les cas de structures régulièrement inspectées et conçues pour tolérer des dommages. La publication [2] résume les différents développements des méthodes probabilistes pour la vérification des structures soumises à la fatigue. Il existe des exemples d'utilisation des courbes S-N pour la conception en fatigue des ponts, où les inspections sont implicitement prises en compte en prenant des niveaux de fiabilité inférieures à celles de l'EN1990, par exemple $\beta = 2$ à 3 pour toute la durée de vie [26]. Comme les valeurs données dans la norme EN 1990 et la SIA sont uniquement indicatives, de telles approches ne sont donc pas contraires aux normes. Il faut cependant les analyser de manière critique, en particulier par rapport à la valeur ajoutée des inspections car celle-ci est fonction de la fréquence et du type d'inspection.

Un résumé des valeurs cibles que l'on trouve dans les différentes normes internationales, EN 1990 (et SIA), JCSS [17] et ISO 2394, sont résumées dans le Tableau 12.1. On remarque que ce sont approximativement les mêmes valeurs, mais pas toujours données pour les mêmes périodes de référence. Dans la norme EN 1990, les valeurs cibles sont données pour une période de référence en années de $y = 1$ et $y = 50$ et elles sont liées à la Classe de Conséquence (CC) : CC3 pour les structures dont la défaillance a un impact économique important et/ou provoque des pertes humaines significatives, CC2 pour les conséquences moyennes et CC1 pour les conséquences mineures. Il convient de noter que les valeurs de $y = 1$ et $y = 50$ ne sont cohérentes que si les variables sont totalement indépendantes, ce qui n'est pas correct dans le cas de la fatigue. Une correction est proposée par Maljaars et al. [16]. L'EN1990 (annexe C, tab. C.3) met ensemble les différents ELU

(persistent and transient, fundamental, and fatigue design situations) et exige les mêmes valeurs de fiabilité cible β, en fonction de la classe de conséquence (CC).

On constate que l'indice de fiabilité "moyen" vaut environ $\beta_{tgt,100}$ = 4 pour une durée de vie de 100 ans (1 rupture sur 100'000 ouvrages durant leur durée de service). Et rappelons-le, il s'agit d'un problème de sécurité lié à la fatigue ELU type 4, et non pas à un état limite ultime ELU type 2. Une rupture due à la fatigue n'est pas due à un seul chargement instantané de l'ouvrage mais se produit sur une période de temps longue pour qu'une fissure puisse se former et se développer, d'où l'importance des inspections régulières. La littérature contient de nombreux cas de fissures détectées avant d'être critiques [21]. Et dans les cas de ruptures provoquées par la fatigue, la majorité ne correspondent pas à des effondrements, citation de [21] "*metallic bridge failures, out of a total of 164 cases, 60 cases of fatigue failure, with 49 of those being non-collapse failures, which corresponds to 81%, not accounting for all non-reported cases where fatigue damage was detected by inspection before any failure, and repaired*".

Tableau 12.1 – Résumé des valeurs cibles β_{tgt} de plusieurs normes (en gras les valeurs données dans les normes, les autres ont été calculées)

Période de référence [années]	**EN 1990 Classe de conséquence de rupture**			**JCSS et ISO 2394 Pertes, coûts relatifs des mesures de sécurité**	
	CC1	CC2	CC3	Classe 2	Classe 4
100	3.2	3.7	4.2	3.6	4.2
50[a]	**3.3 (10^{-3})**	**3.8 (10^{-4})**	**4.3 (10^{-5})**	3.7	4.3
1	4.2	4.7	5.2	**4.2**	**4.7**
1[b]	3.8	4.2	4.7		

[a] *les valeurs entre parenthèses correspondent aux probabilités de rupture annuelles (valeurs arrondies)*
[b] *valeurs de l'EN 1990 transformées pour tenir compte d'une corrélation partielle dans le temps des évènements en cas de dégradation par fatigue, voir [10]*

Et pour ce qui concerne les vérifications avec la méthode lambda, λ, ou avec le cumul de dommage, aucune calibration par rapport à un niveau de fiabilité cible n'a été effectuée (i.e. c'est un paramètre national (NDP), la plupart des pays ont estimé le niveau de sécurité comme étant suffisant en utilisant les valeurs par défaut des facteurs partiels après comparaison avec les normes nationales de la génération précédente). Les valeurs des facteurs de résistance donnés dans l'EN1993-1-9, la SIA 263 et la SIA 269/3 sont résumées dans le Tableau 12.2.

Tableau 12.2 – Résumé des valeurs du facteur de résistance en fatigue γ_{Mf} selon plusieurs normes

Norme	**Concept de sécurité**	**Normes en préparation (EN 2nde génération) Classes de conséquence**			**Normes actuelles Conséquences de défaillance, dégâts**	
		CC1	**CC2**	**CC3**	**Peu importants (CC1 et CC2)**	**Importants (CC3)**
FprEN 1993-1-9 : 2024[a]	(a) Damage tolerant concept	1,00	1,15	1,25		
	(b) Safe-life concept	1,15	1,25	1,35		
SIA 263 :2013 (et EN1993-1-9 : 2005[a])	(a) Possibilité de constater et réparer les dommages				1,00	1,15
	(b) Impossibilité de constater et réparer les dommages				1,15	1,35
SIA 269/3 : 2011[b]	(a) Détail inspecté et sans dommage				1,00	1,00

	(b) Détail impossible à inspecter				1,15	1,35

[a] *les valeurs sont des NDP*
[b] *valeurs du facteur de résistance actualisé,* $\gamma_{Mf,act}$

Par ailleurs, les normes actuelles définissent la valeur par défaut du facteur des effets d'action en fatigue, γ_{Ff}, comme égale à 1,00. Ceci pourrait évoluer avec les Eurocodes de la 2nde génération, mais ce facteur restera comme un NDP.

Dans le cadre de ce travail, il n'est d'une part pas possible d'effectuer des analyses de fiabilité complètes pour fixer les courbes caractéristiques lambda λ et les différents facteurs partiels de sécurité. D'autre part, comme il a été décrit précédemment, les valeurs de l'indice de fiabilité cible en fatigue ne sont pas définitivement fixées, elles restent sujettes à interprétation. Il est toutefois possible de vérifier que le niveau de sécurité, i.e. caler nos courbes lambda, est suffisant par rapport aux normes en vigueur (et à des valeurs cibles logiques et cohérentes) en procédant comme décrit dans la section suivante.

12.6.1 Approche pour vérifier le niveau de fiabilité

L'approche consiste à effectuer les réflexions et calculs suivants :

1) Etablir une liste des différentes variables et types d'erreur ou incertitude, de leur influence et la manière dont elles sont prises en compte (ou non),
2) Utiliser l'annexe D de l'EN 1990 traitant de la détermination des facteurs partiels, avec des compléments de la littérature, pour caler nos courbes lambda, soit :
    i. confirmer les différents indices de fiabilité cible en fatigue correspondants aux différentes Classes de Conséquences et d'inspection (côté résistance),
    ii. déterminer, côté effets d'action, la courbe caractéristique lambda à utiliser pour atteindre les différents indices cible déterminés sous 2a.

La première étape permet d'avoir une vue d'ensemble des différentes variables et incertitudes dans la procédure de détermination des courbes lambda. Il est ainsi possible de discuter de manière critique s'il y a dans la procédure un équilibre entre les paramètres qui sont pris de manière conservative et ceux qui ne le sont pas.

12.6.2 Liste des différentes variables et types d'erreur

La procédure de détermination des courbes lambda se base sur un modèle de calcul qui compare le dommage provoqué en faisant circuler des compositions de trains et de trafics sur des lignes d'influence par rapport au dommage provenant du modèle de charge. Il a été décidé de considérer 42 types de compositions et de trafic et 54 lignes d'influence, ce qui dépasse largement la quantité de simulations effectuées jusqu'à maintenant pour fixer de telles courbes. Notons par ailleurs que les courbes actuellement dans la norme SIA ne sont pas basées sur une analyse de fiabilité et pourtant sont considérées en sécurité (i.e. il faut comparer/justifier tout changement par rapport à ces dernières).

Le Tableau 12.3 résume les différentes variables, types d'erreur ou incertitude, et leur influence (conservatrice ou non, considérée ou non). A la lecture de ce tableau, on remarque que :

- Le fait d'utiliser 42 trafics et 54 lignes d'influence pour déterminer, pour chaque longueur déterminante, la distribution de la valeur lambda (moyenne μ et écart-type σ) conduit à des valeurs conservatrices car cela augmente l'écart-type ;
- En Suisse, la qualité de la maintenance des voies ferrées peut être jugée comme très élevée. Les rails présentent généralement une géométrie régulière, ce qui réduit les effets dynamiques qui amplifient l'endommagement par fatigue. Ces effets sont intégrés dans les calculs avec le coefficient dynamique $1+\varphi$;

- En Suisse, la qualité de surveillance est très bonne avec des inspections régulières des ouvrages, qui augmentent la possibilité de détecter une fissure à temps pour une réparation. On pourrait donc réduire β_{tgt};
- Les facteurs d'incertitude qui affectent le modèle de calcul utilisé sont parfois favorables et parfois défavorables, ce qui amène à une compensation des effets d'incertitude.

Tableau 12.3 – Liste des différentes variables, types d'erreur ou incertitude, et leur influence

Variables	**Type d'erreur/incertitude**	**Remarques**	**Considéré ? Conservateur ?**
1 trafic	Aléatoire	Nb de simulations ? 1 ou 100, dispersion très faible	Non, négligeable
42 trafics	Epistémique	Trafics passé/présent/futur	Oui, σ ↗
54 lignes d'influence	Aléatoire & épistémique	Pas de séparation en groupes	Oui, σ ↗
De modèle	Epistémique Lognormal, m_{CM} = 0.97, σ_{CM} = 0.085	Pas considérée (méthode détermination ligne d'influence & contrainte par l'ingénieur)	Non, non-conservative
Facteur dynamique	Aléatoire	La part épistémique est considérée dans φ_{fat}. Dépend de la qualité de maintenance des voies	Non, conservative si niveau maintenance élevé
β_{tgt}	Epistémique	Manque d'infos, par ex. sur facteurs de sensibilité, fct de σ_{Ed}/σ_{Rd} [26]: CC2: 3.04 < $\beta_{tgt,100}$ < 4.04	Oui, β_{tgt} selon ELU type 2 conservatrice pour fatigue, conservative si bonne surveillance

En conclusion, nous avons acquis la conviction qu'il y a un équilibre entre les paramètres qui sont pris en manière conservatrice et ceux qui ne le sont pas dans notre procédure.

Finalement, considérons une valeur d'indice de fiabilité $\beta_{tgt,100}$ = 4, qui correspond à 4 écart-type par rapport à la fonction d'état limite de rupture, après transformation en loi normale centrée. Par un raisonnement simple, comme la courbe lambda caractéristique est typiquement choisie comme fractile 95% (ce qui correspond à μ + 1,64σ), les courbes caractéristiques de résistance sont aussi avec un 95% fractile et que le facteur de résistance moyen γ_{Mf} vaut 1,15, en effectuant une vérification on doit donc être proche des 4 écart-types requis. C'est ce que nous allons vérifier dans le paragraphe suivant.

12.6.3 Calage des courbes lambda en utilisant l'annexe D de l'EN 1990

On part du format de vérification semi-probabiliste $E_d \leq R_d$ qui pour des variables normales et selon l'EN1990, peut s'exprimer comme suit :

$$\underbrace{E_m\left(1-\alpha_E\cdot\beta_{tgt}\cdot\nu_E\right)}_{\gamma_F} \leq \underbrace{R_m\left(1-\alpha_R\cdot\beta_{tgt}\cdot\nu_R\right)}_{1/\gamma_M}$$

Où :

- α_E : facteur de sensibilité des effets d'actions, égal à 0,7 (en valeur absolue)

- α_R : facteur de sensibilité de la résistance, égal à 0,8 (en valeur absolue)
- β_{tgt} : indice de fiabilité cible correspondant aux différents cas (classes de conséquences, inspections ou non, etc.) et durées de service
- ν_E, ν_R : coefficients de variation des effets d'actions et de la résistance, respectivement
- γ_F, γ_M : facteurs partiels sur les effets d'actions et sur la résistance, respectivement

La sécurité des ouvrages d'art est donc assurée par les facteurs de sécurité partiels qui, dans le cas de la fatigue, sont : pour les actions γ_{Ff} et pour la résistance γ_{Mf}, et qui sont données dans les normes.
Dans le cas de la fatigue, la résistance s'exprime à l'aide de courbe S-N, qui suivent une loi log-normale. Il faut donc adapter le membre de droite de l'expression précédente, selon l'EN1990, et le facteur partiel de résistance peut alors s'exprimer comme suit :

$$\gamma_{Mf} = \frac{R_{rep}}{R_d} = \frac{1}{bias_\mu} exp\left(\nu_{Rf}\left(\alpha_{Rf} \cdot \beta_{tgt} - k_{Rf}\right)\right)$$

Où, pour les termes non-définis ci-dessus :

- k_{Rf} : nombre d'écart type σ_R
  $R_{95} = R_m - k_{Rf} \cdot \sigma_R$
  Le facteur k_{Rf} dépend du nombre d'essais de laboratoire pour déterminer la résistance à la fatigue
- $bias_\mu$: facteur d'erreur systématique entre le modèle avec les résultats d'essai.

Pour trouver les valeurs du facteur partiel de résistance, il nous faut :

- Les valeurs de l'indice de fiabilité cible qui correspondent aux différents cas. Les valeurs considérées dans cette étude sont résumées dans le Tableau 12.4. Pour les cas **sans inspection (safe life)**, les valeurs de l'EN1990 déterminées pour 100 ans sont utilisées.
- Pour les cas **avec inspections (classés comme « damage tolérant »)**, il faut déterminer les valeurs de l'indice cible car elles ne sont pas données dans l'EN1990. Nous avons choisi d'utiliser des valeurs tirées d'une étude par Maljaars et al. [1]a.[16], qui considèrent des inspections visuelles et leur POD (proba. de détection), effectuées seulement tous les 25 ans (lors du renouvellement des parements, peinture, etc.) ; des inspections plus rapprochées, 5-10 ans, sont la règle en Suisse et donc une probabilité de détection beaucoup plus élevée a été utilisée.
- Les courbes de fatigue sont définies comme des fractiles 95%, avec un coef. de variation (COV) typique de 0,22 (varie entre 0,17 et 0,25 selon le détail constructif [1]a.[48]), un nb limité d'essais, k_{Rf} = 2. Il n'y a pas de biais notable dans le modèle des courbes S-N, $bias_\mu$ = 1,0.

Tableau 12.4 – Valeurs de l'indice cible pour 100 ans, $\beta_{tgt,100}$, pour cette étude

	Classe de conséquence de rupture		
	CC1	**CC2**	**CC3**
Damage tolerant[a]	2,70	3,30	3,90
Safe life	3,10	3,60	4,20

[a] *tient compte des inspections*

Ces calculs donnent, voir le Tableau 10.5, des estimations pour les valeurs du facteur de résistance. On constate que ces valeurs sont cohérentes avec celles donnés dans les normes SIA 263 et SIA 269/3 (entre 1,00 et 1,35).

Tableau 12.5 – Valeurs estimées pour le facteur de résistance, γ_{Mf}

	Classe de conséquence de rupture		
	CC1	**CC2**	**CC3**
Damage tolerant[a]	1,04	1,14	1,28
Safe life	1,12	1,22	1,35

[a] *tient compte des inspections*

Cette confirmation de la représentativité des valeurs des différents indices de fiabilité cible étant effectuée, le côté des effets d'actions peut finalement être étudié. Les charges de fatigue ne suivent pas une loi normale, mais la distribution des valeurs des courbes lambda qui représentent les effets d'action du trafic pour la fatigue peut être admise comme une loi normale. Le facteur partiel des effets d'action peut alors s'exprimer comme suit :

$$\gamma_{Ff} = \frac{E_d}{E_{rep}} = \frac{\left(1 - \alpha_{Ef} \cdot \beta_{tgt} \cdot \nu_{Ef}\right)}{1 + k_{Ef} \cdot \nu_{Ef}} \leq 1{,}05$$

Où, pour les termes non-définis ci-dessus:

- k_{Ef} : nombre d'écart type σ_E sur la distribution de lambda
- ν_{Ef} : coefficient de variation de la distribution de lambda

Dans cette expression, il reste deux variables inconnues, γ_{Ff} et k_{Ef}. On impose que l'on veut garder un facteur partiel γ_{Ff} unitaire, ceci avec une tolérance de 5%, donc au maximum 1,05. Pour chaque cas et longueur déterminante L_λ comme la dispersion varie, une valeur pour le paramètre d'ajustement k_{Ef} est obtenue. Avec toutes les valeurs caractéristiques de lambda il est possible de définir la courbe caractéristique lambda. Il se trouve que les valeurs les k_{Ef} varient peu, elles se situent entre 2 et 2,2. La Figure 12.5 reproduit les courbes λ_1 correspondants à différents intervalles de confiance, dont celle correspondant à k_{Ef} = 2,2.

Avec ces réflexions et calculs, bien que notre approche reste basée sur des modèles simplifiés, nous avons pu démontrer que notre courbe lambda caractéristique satisfait les valeurs de l'indice de fiabilité cible de dimensionnement, donc garanti un niveau de sécurité suffisant.

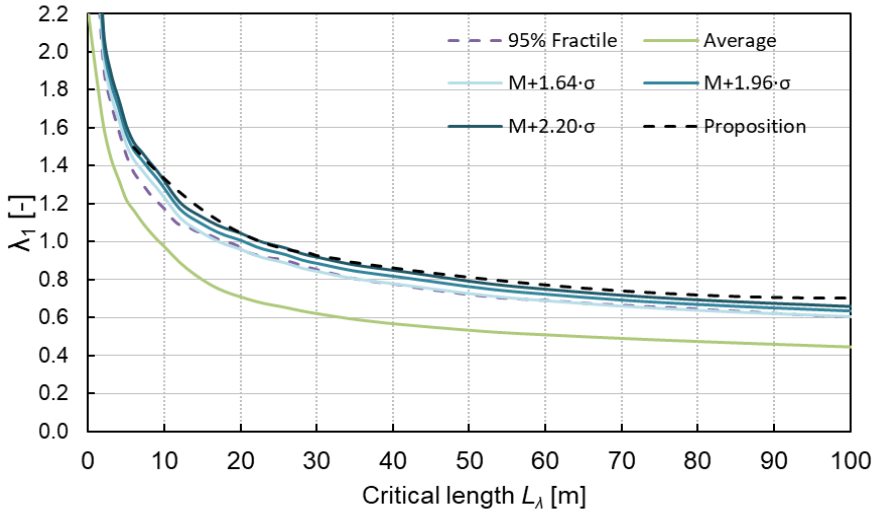


Figure 12.5 –Courbes λ_1 correspondant à différents intervalles de confiance (ou caractéristiques)

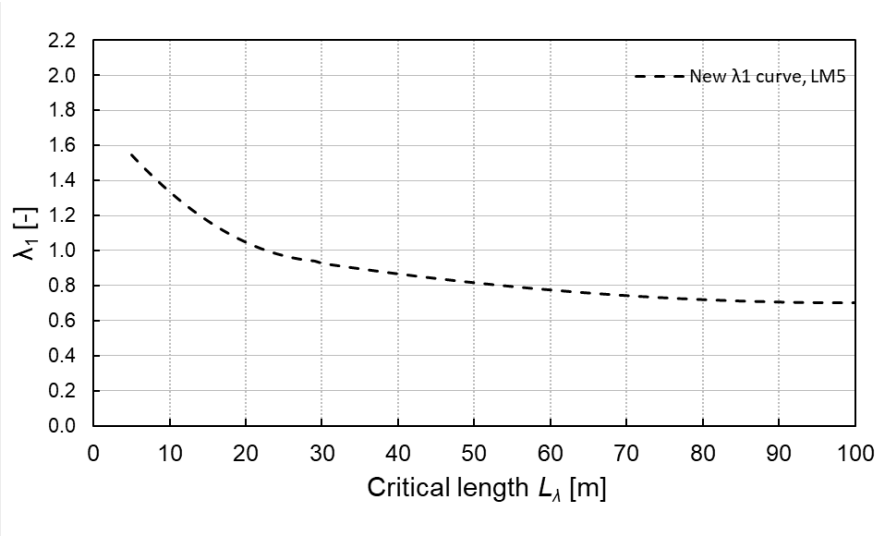
Notons finalement que le niveau de ces courbes et donc de sécurité peut être influencé par d'autres évolutions dans les normes. Leur avantage ainsi que démontré plusieurs fois dans ce rapport est qu'une correction du niveau peut être effectué avec un facteur multiplicatif.

Concernant le facteur pour la classification des modèles de charge normalisés on prendra α = 1,13, cette valeur ne figure pas encore dans la norme SN 505 261, mais a été établie dans le cadre d'un accord entre l'OFT et les compagnies ferroviaires. La valeur α = 1,13 devrait avoir été introduite lors de la dernière révision des DE-Oferr (en 2024). Cette valeur a été fixée pour tenir compte d'une augmentation du poids par essieu du matériel roulant (18 à la place de 16 to) dans le futur pour les vérifications aux ELU. Elle n'a pas été fixée ou discutée par rapport à la fatigue. Dans ce cas, des essieux de 18 to ont été considérés, donc il n'y pas à multiplier par ce facteur.

12.7 Version finale

La version finale de la courbe est donc présentée dans ses versions graphique, tabulaire et avec son équation (part 1 : 5-30 m, part 2 : 30-100m) dans la Figure 12.6.

$a \cdot x^3+b \cdot x^2+c \cdot x+d=0$	a	b	c	d
part 1	0.0	1.24E-03	-6.00E-02	1.73E+00
part 2	0.0	4.00E-05	-9.30E-03	1.20E+00



L_λ	λ_1
5	1.54
6	1.50
7	1.46
8	1.41
9	1.37
10	1.33
12	1.26
15	1.17
17	1.11
20	1.05
25	0.97
30	0.93
35	0.89
40	0.87
45	0.84
50	0.82
60	0.77
70	0.74
80	0.72
90	0.70
100	0.70

Figure 12.6 –Courbe λ_1, nouvelle version pour modèle de charge

13 Trafic des tramways et LM4

Dans les chapitres précédents, on a vu que les volumes du trafic, les poids moyens par essieu et le nombre d'essieux sont repris par le facteur partiel λ_2 et que le facteur partiel λ_1 se limite à mettre en relation les géométries des trains avec celles des lignes d'influence et du modèle de charge.

En partant de cette hypothèse, on constate que les géométries des trains des tramways ne sont pas trop éloignées des géométries des trains à voie étroite (par rapport au trafic routier dont les variations entre un pays et l'autre sont plus grandes). On peut partir du fait que la courbe λ_1 des tramways sera simplement une translation verticale de la courbe des trains à voie étroite avec une facteur de translation qui considère le rapport entre les résultats avec le LM4 et LM5.

L'autre possibilité pour éviter la translation de la courbe du LM5 serait de faire le même travail fait pour le trafic ferroviaire à voie étroite mais en insérant un certain nombre de données de trafic des tramways, en arrivant à un nombre suffisant des trafics. Pour le moment cette possibilité a été exclue en faveur de la translation de la courbe et sa validation, présenté dans les paragraphes suivants.

13.1 Trafic réel utilisé

Les données des trafics des tramways à disposition de l'EPFL sont les suivantes :

- Bern Mobil
- TP Genevois
- VBZ Züri-Linie
- BVB Basler Verkehrs-Betriebe

Certains trafics ne sont pas complets, on a choisi un des plus complet et avec des types des trams différents, on procède donc avec le trafic zurichois, en particulier les lignes :

- Linie 11 : Q_{obs}=79 kN, N_{obs}= 729'474 essieux/an, V_{obs}= 6,59 Mio ton/an avec trams Flexity
- Linie 13 : Q_{obs}=64 kN, N_{obs}= 889'976 essieux/an, V_{obs}= 5,18 Mio ton/an avec trams 2000 DT (50%) et Cobra (50%)
- Linie 14 : Q_{obs}=70 kN, N_{obs}= 961'721 essieux/an, V_{obs}= 6,05 Mio ton/an avec trams 2000 DT (50%) et Flexity (50%)

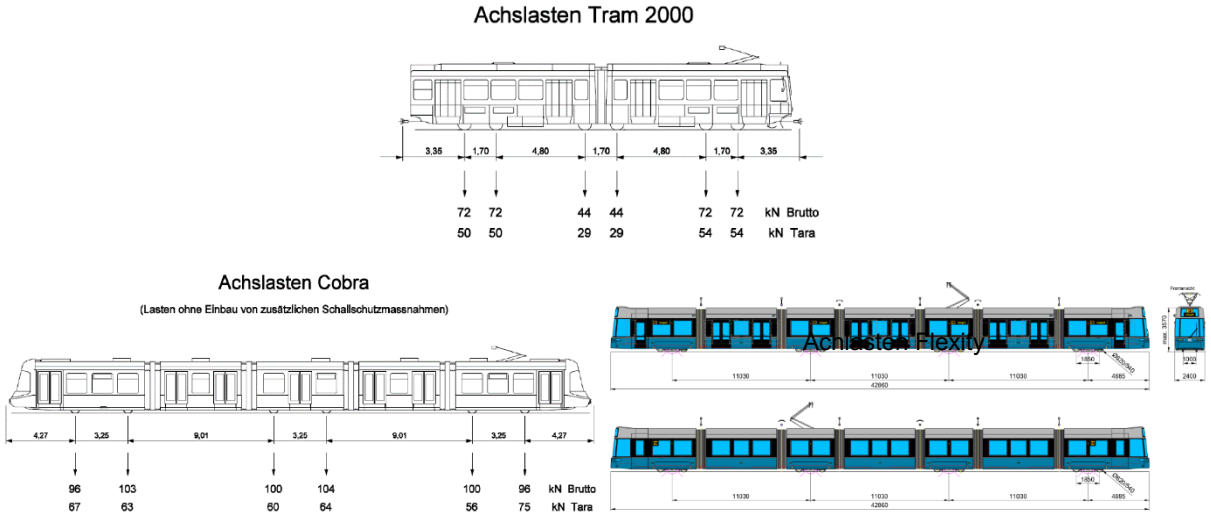


Figure 13.1 –Types de trams VBZ

La géométrie des wagons a été pris directement des données de VBZ. Le poids avec **30%** de l'occupation maximale a été utilisé pour calculer le poids par essieu moyen (en plus il faut rappeler que les algorithmes génèrent des trains aléatoires avec une variation par essieu de ±10%). Le nombre des trains enfin a été repris à partir des nombres de course par semaine à partir des données VBZ.

Avec ces données, on calcule le poids moyen par essieu Q_{obs}, le nombre par année d'essieux N_{obs} et enfin le volume en tonnes par année V_{obs} qui a été décrit précédemment.

13.2 Facteurs de translation

Obtenir ces facteurs de translation est très simple, il est suffisant de faire rouler les simulations pour les mêmes types des trafics, en ces cas les lignes zurichoises, une fois avec le LM4 et une fois avec le LM5, (le trafic réel sera le même pour les deux cas).

Après avoir obtenu les courbes λ_1 pour le LM4 et LM5 de chaque trafic, le rapport entre ces deux courbes donne le facteur de translation de la courbe pour passer de LM5 à LM4.

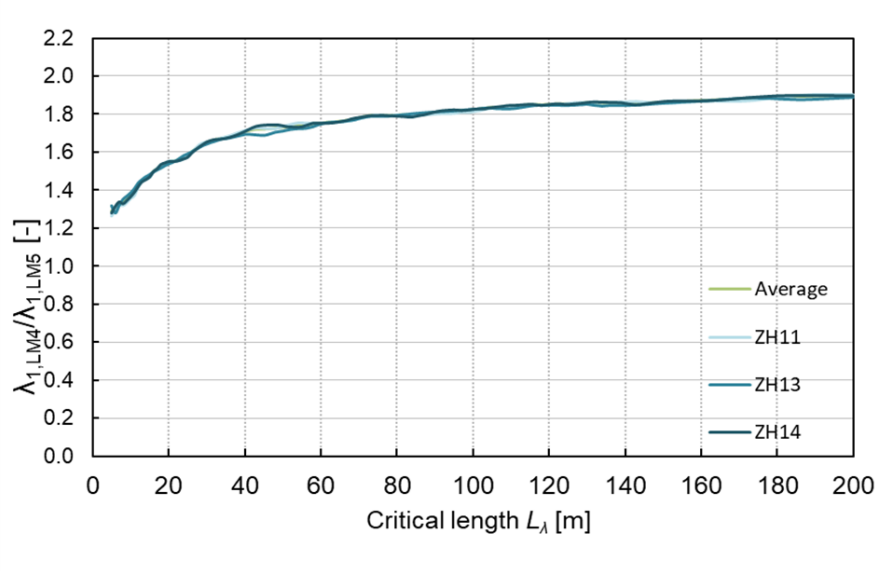


Figure 13.2 –Facteurs de translation de la courbe λ_1

Le calcul a été fait pour les trois lignes montrées précédemment et montre le même comportement :

- Petites portées: le rapport $\lambda_{1,LM4}/\lambda_{1,LM5}$ tend vers le rapport $Q_{k,LM4}/Q_{k,LM5}$, l'effet de la charge répartie q_k du modèle de charge n'affecte pas le $\Delta\sigma(Q_{fat})$;
- Grands portées: le rapport $\lambda_{1,LM4}/\lambda_{1,LM5}$ tend vers le rapport $q_{k,LM4}/q_{k,LM5}$, l'effet de la charge ponctuelle Q_k du modèle de charge n'affecte pas le $\Delta\sigma(Q_{fat})$.

Avec ces facteurs de translation, la courbe se déplace vers le haut comme on peut l'observer sur la Figure 13.3.

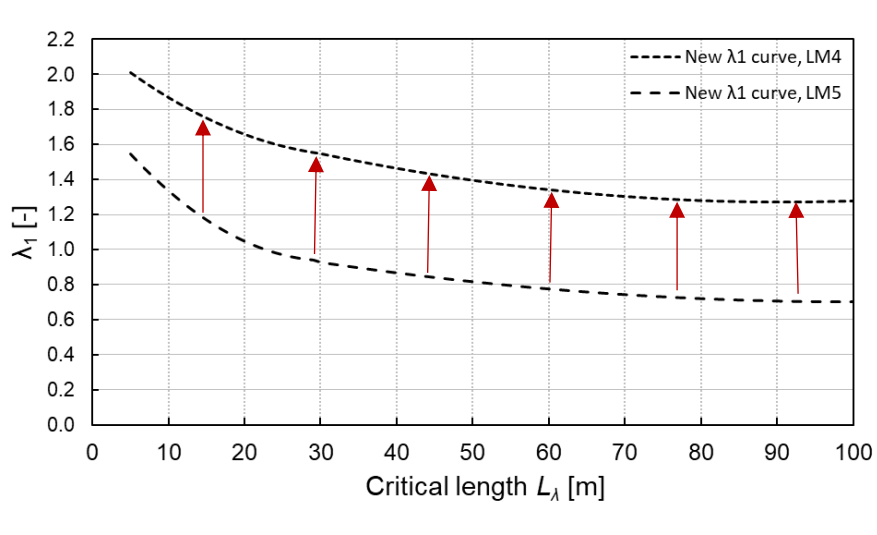


Figure 13.3 –Translation de la courbe $\lambda_{1,LM5}$ pour obtenir la courbe $\lambda_{1,LM4}$

13.3 Validation

Pour voir si cette courbe fonctionne bien, il est suffisant de faire un calcul en utilisant cette nouvelle courbe, en suivant la procédure ci-dessous :

- Calcul avec la courbe $\lambda_{1,LM4}$ obtenue à partir de la courbe $\lambda_{1,LM5,}$ en appliquant après le facteur de correction λ_2 avec les données de volume du trafic correspondant ;
- Simulations du trafic réel de la ligne correspondant, avec le vrai trafic et le vrai volume LM4 et le trafic des lignes zurichoises (les résultats obtenus seront donc déjà $\lambda_1 \cdot \lambda_2$ parce on n'utilise pas 12 Mio ton/an de trafic mais le vrai volume de la ligne) ;
- Comparaison entre les deux.

En ce qui concerne l'application du facteur partiel $\lambda_{2,}$ on montre les trois niveaux de vérification, avec dans le cas plus conservateur λ_2=1,00 (donc $\lambda_1 \cdot \lambda_2 = \lambda_1$) et la courbe reste inchangée (Voir Figure 13.3 du LM4). Le deuxième cas utilise l'application du λ_2 en fonction du volume V_{obs} et le troisième cas est le plus détaillé avec l'application du λ_2 en fonction du nombre d'essieux N_{obs} et le poids moyen par essieu Q_{obs}. Le tableau suivant montre les facteurs partiels λ_2 pour les trois lignes :

Tableau 13.1– Facteur de correction λ_2 pour les trois lignes

Facteur de correction λ_2 pour les trois lignes	**λ_2, niveau de calcul 1**	**λ_2, niveau de calcul 2**	**λ_2, niveau de calcul 3**
Ligne 11	1,00	0,87	0,71
Ligne 13	1,00	0,85	0,52
Ligne 14	1,00	0,87	0,58

La ligne 13 a la plus grande réduction du facteur λ_1 à travers le λ_2 car elle possède un poids moyen par essieu de Q_{obs}=64 kN. En faisant le calcul uniquement en se basant sur le volume V_{obs}, les trois trafics ont des facteurs partiels λ_2 similaires, dû aussi au fait qu'en utilisant le volume V_{obs}, la formule est exponentielle en 1/m.

Dans la figure suivante on montre les résultats des trois trafics considérés. En rouge on montre le fractile 95% de l'ensemble des 54 types de lignes d'influence.

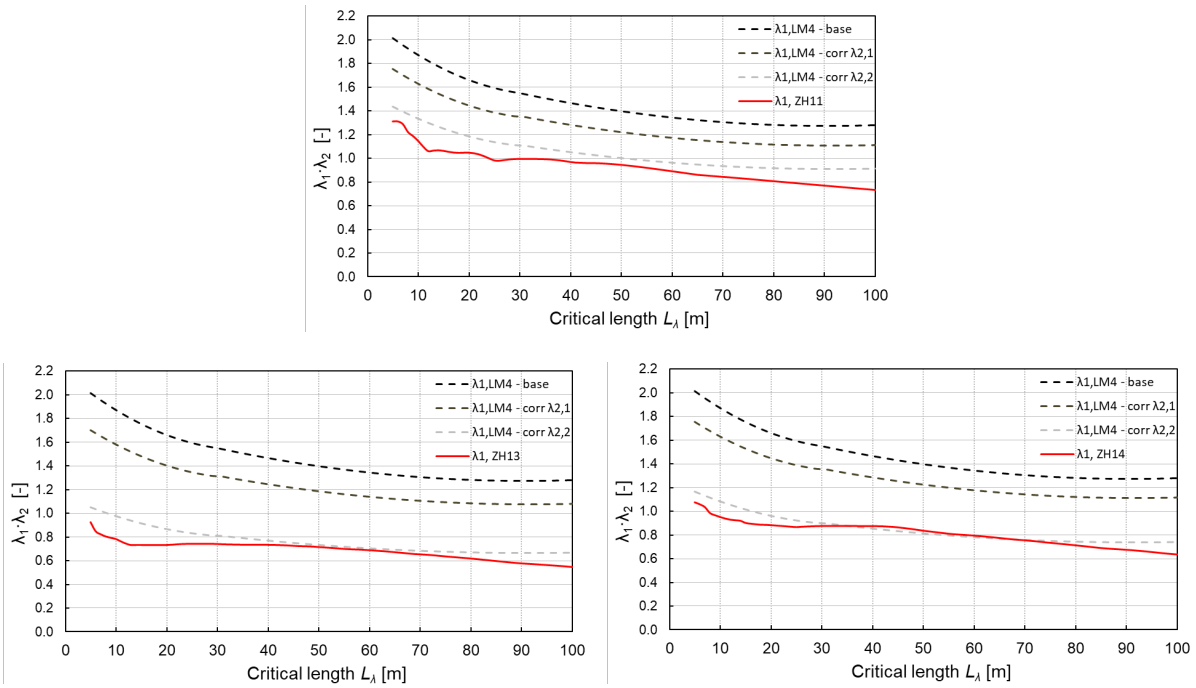
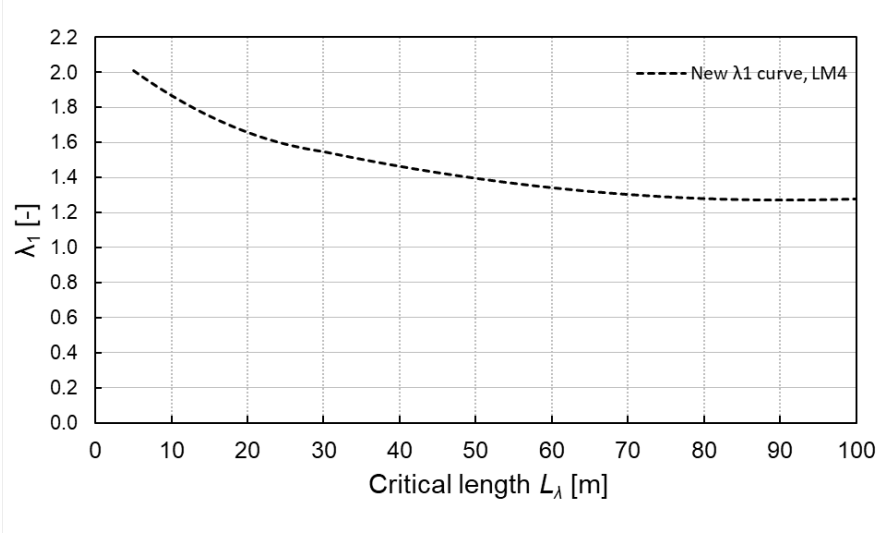


Figure 13.4 –Validation avec les trois lignes zurichoises

L'utilisation de la courbe $\lambda_{1,LM4}$ obtenue en partant de la courbe $\lambda_{1,LM5}$ donne de très bons résultats et la correspondance est bonne. Aussi l'application du facteur λ_2 est en général conservatrice pour les trois niveaux de calcul. De futures optimisations seront possible en obtenant la courbe $\lambda_{1,LM4}$ directement des trafics des tramways au lieu de faire une translation de la courbe $\lambda_{1,LM5}$.

13.4 Version finale

La version finale de la courbe $\lambda_{1,LM4}$ est donc présentée dans ses versions graphique, tabulaire et avec son équation (part 1 : 5-30 m, part 2 : 30-100m) dans la Figure 13.5.



L_λ	λ_1
5	2.01
6	1.98
7	1.95
8	1.92
9	1.90
10	1.87
12	1.82
15	1.75
17	1.71
20	1.66
25	1.59
30	1.55
35	1.51
40	1.47
45	1.43
50	1.40
60	1.34
70	1.31
80	1.28
90	1.27
100	1.28

Figure 13.5 –Courbe λ_1, nouvelle version pour modèle de charge 4

14 Conclusions

Cette étude a permis de clarifier ce que contient la méthode simplifiée de vérification en fatigue, ou méthode λ, qui a été développée pour les nouvelles structures. Au moyen d'algorithmes qui n'étaient pas disponibles lors de l'implémentation de la version actuelle de la méthode λ, il a été démontré qu'elle peut être adaptée pour la vérification d'ouvrages existants lors d'un examen général, car elle reste souvent très conservatrice. Pour un examen détaillé, on préférera l'utilisation de la méthode du cumul de dommage, dont les avantages sont présentés par ex § 7.3 de ce rapport dans le cas d'un trafic réel spécifié.

Cette étude a permis de clarifier et de simplifier la méthode λ. Ceci est résumé dans le chapitre 3 sous la forme d'une proposition de mise à jour de la norme SIA 261 (et par conséquent aussi de la SIA 269/1). Cette proposition contient différentes améliorations de la méthode, la plus importante étant la définition de deux nouvelles courbes pour le facteur partiel λ_1 qui représente l'effet du chargement, voir Figure 14.1; ces courbes ont été créées en utilisant les trafics à voie étroite en Suisse et sont donc plus réalistes. Parmi les améliorations, on notera également la clarification de la pente de résistance m à utiliser et des modifications telles qu'une nouvelle équation pour le calcul du facteur partiel pour le volume du trafic λ_2. La proposition contient aussi un article par rapport à la vérification avec le cumul de dommage.

Les incertitudes quant à la méthode λ, ses hypothèses et données, ainsi que pour l'établissement des courbes λ sont décrites au chap. 12.

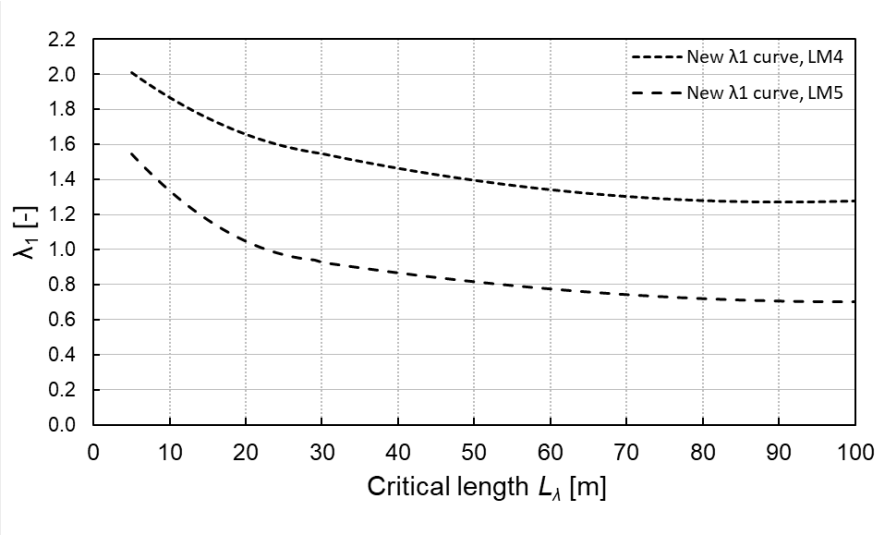


Figure 14.1 – Courbes λ_1 pour les modèles de charge 4 et 5

14.1 Points en suspens

L'étude a permis de clarifier plusieurs points qu'il n'était pas possible d'étudier en détail auparavant en raison de la limitation des moyens de calculs et des connaissances. Il reste néanmoins toujours quelques points de discussions en suspens qu'il faudra considérer dans de futures études :

- Simulations de plusieurs lignes de tramways pour obtenir une courbe spécifique $\lambda_{1,LM4}$ à partir de trafic de plusieurs villes suisses ;
- Simulations de diverses lignes d'influence pour le trafic ferroviaire à voie normale afin de confirmer que la courbe λ_1 actuelle est valable plus généralement pour toutes les lignes d'influence (et pas seulement pour un nombre limité de lignes d'influence) ;
- Finalisation du logiciel de calcul et sa documentation, pour la mise à jour des courbes pour un

trafic futur ainsi qu'éventuellement pour des études sur le développement du matériel ferroviaire.

14.1.1 Trafic des tramways

Pour le premier point, on peut se demander s'il serait utile de générer la courbe $\lambda_{1,LM4}$ directement avec des simulations du trafic des tramways réel suisse, car même si l'utilisation d'une courbe générée en partant de la courbe $\lambda_{1,LM5}$ est conservatrice pour presque toutes les longueurs déterminantes L_λ comme on le voit dans la Figure 13.4, il y aura d'autre part pour des portées entre 10 et 20 m une certaine marge d'optimisation. Générer la courbe $\lambda_{1,LM4}$ en partant directement des simulations des tramways pourrait ainsi donner une courbe plus économique ou une confirmation complète de la justesse de cette courbe.

Mais l'autre aspect déterminant de cette réflexion est l'application du facteur partiel λ_2 pour le trafic des tramways, qui fonctionne bien en appliquant le niveau du calcul le plus détaillé (en considérant Q_{obs} et N_{obs}) comme on le voit dans la Figure 13.4 En revanche, dans le cas où l'ingénieur n'a pas de données sur les géométries ou sur le volume, il doit donc utiliser une valeur $\lambda_2 = 1{,}00$. Le calcul va être trop conservateur et, pour toutes les longueur déterminantes L_λ inférieur à 50 m (la partie de la courbe λ_1 dont la valeur est supérieure à 1.4) il tendra à appliquer directement le facteur $\lambda_{max} = 1{,}40$.

Ce problème est dû au fait que les paramètres de référence qui seront utilisés dans le cas où l'on admet $\lambda_2 = 1{,}00$ (**V_0=12 Mio ton/an, Q_0=120 kN**), représentent la borne supérieure du trafic ferroviaire à voie étroite et sont peut-être très élevées pour le trafic des tramways. Ils sont par exemple plutôt de V_0=7 Mio ton/an et Q_0=80 kN pour le trafic zurichois.

Pour avoir une mise à jour complète, il faudrait donc analyser un nombre suffisant de lignes de tramways et recalibrer les facteurs λ_1 et λ_2 comme cela a été fait pour le trafic ferroviaire à voie étroite. La valeur λ_1 descendra dessous de 1,40 (parce V_0 et Q_0 seront réduits aussi) et même sans données sur le volume et la composition du trafic, il sera possible d'utiliser une valeur $\lambda_2 = 1{,}00$ sans être excessivement conservateur (en utilisant donc peut être V_0=7 Mio ton/an et Q_0=80 kN au lieu de V_0=12 Mio ton/an, Q_0=120 kN).

Les travaux futurs pour analyser ce trafic pourraient être :

- Analyse détaillée des données de trafic de Bâle, Bern Mobil, TP Genevois et Verkehrsbetriebe Zürich ;
- Modélisation de différentes lignes à partir des types de trafic décrits ci-dessus ;
- Simulation lambda 1 avec différents types de trafic ;
- Calibration du facteur λ_2 et proposition de V_0 et Q_0 sur la base du trafic urbain à voie étroite (tramways) ;
- Analyse de la fiabilité.

14.1.2 Trafic ferroviaire à voie standard

L'étude a montré que la courbe actuelle de la norme SIA 261 (reprise de l'EN 1993-2) utilise un seul type de trafic et un nombre limité de lignes d'influence, ce qui n'est pas conservateur et ne permet pas d'avoir une corrélation avec le trafic suisse. Ceci est dû aux moyens de calcul disponibles à l'époque pour effectuer des simulations avec différentes lignes d'influences et types de trafic.

Les travaux futurs pour analyser ce trafic pourraient être :

- Simulations du trafic des voies normales en utilisant le trafic utilisé pour la version actuelle de la courbe λ_1 (standard traffic mix de la norme EN 1991-2) en utilisant différentes lignes d'influence (54 au lieu des deux utilisées dans le passé) ;
- Introduction du trafic de voie standard suisse ou, en l'absence de données, création d'autres types des trafics de voie normale en modifiant ceux utilisés dans la norme actuelle (standard traffic mix de la norme EN 1991-2) en variant les pourcentages de trains ;
- Évaluation de la situation actuelle, proposition de modifications de la norme (si nécessaire) ou optimisation en fonction du trafic suisse.

14.1.3 Logiciel de calcul

Le logiciel de calcul représente le moyen principal d'exécution de toute cette étude, qui a permis de simuler des centaines de milliers de système statiques en seulement quelques heures. Il est donc fondamental pour une future mise à jour du travail ou une validation avec des nouvelles compositions du trafic, de fournir plus de documentation sur ce logiciel et une version simplifiée pour permettre son utilisation par l'OFT et d'autres compagnies des chemins de fer.

Ce logiciel peut aussi aider pour la commande de nouveaux véhicules, car il permet de vérifier que l'endommagement de l'infrastructure ne soit pas défavorable et donc contre l'intérêt du public. L'infrastructure comprend de très nombreux ouvrages qui doivent si possible être exploités jusqu'à la fin de leur durée d'utilisation normale, il est donc fondamental d'avoir aussi une vérification en ce qui concerne la fatigue de ces ouvrages et permettre l'autorisation de nouveaux véhicules sur une base planifiée.

L'autorité de surveillance devrait avoir à sa disposition un outil permettant de contrôler si le véhicule est trop agressif ou non lors de la commande des véhicules, lors du suivi du développement et de l'homologation. Ce développement futur du logiciel existant de calcul devrait permettre de l'utiliser plus largement ; il nécessite cependant d'être complété de manière que les experts en fatigue ne soient pas les seuls à pouvoir l'utiliser.

15 Références

15.1 Références principales

[1] G. Merzenich, G. Sedlacek – *Hintergrundbericht zum Eurocode 1 - Teil 3.2: Verkehrslasten auf Straßenbrücken,* Forschung Heft Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, 1995.

[2] Maljaars, J., J. Leander, A. Nussbaumer, J. D. Sørensen, and D. Straub. 2025. “Models and methods for probabilistic safety assessment of steel structures subject to fatigue.” *Structural Safety*, 113: 102446. https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2024.102446

[3] N. Maddah – *Fatigue Life Assessment of Roadway Bridges based on Actual Traffic Loads*, PhD Thesis EPFL N°5575, 2013.

[4] SIA Dokumentation D-076 *Grundlagen und Annahmen für den Nachweis der Ermündgssicherheit in den Tragwerksnormen des SIA*, SIA Zürich, 1991.

[5] S. Haldimann – *Ermüdungssicherheit von neuen und bestehenden Bahnbrücken mit Schmalspurbahnverkehr*, Bundesamt für Verkehr (BAV), nov. 2020.

[6] Zusammenfassung Betriebslastfaktoren – ICOM, 1981.

[7] A. Niesłony – *Determination of fragments of multiaxial service loading strongly influencing the fatigue of machine components*, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 23(8), 2009, pp. 2712-2721.

[8] ASTM E 1049-85 (Reapproved 1997) – *Standard practices for cycle counting in fatigue analysis*, in: Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.01, Philadelphia 1999, pp. 710-718.

[9] P. Croce – *Impact of Road Traffic Tendency in Europe on Fatigue Assessment of Bridges*, Applied Sciences 2020, 10:1389, 2020.

[10] J. Maljaars – *Evaluation of traffic load models for fatigue verification of European road bridges*, Engineering Structures, Vol. 225, December 2020.

~~[11] C. P. Baptista – *Multiaxial and variable amplitude fatigue in steel bridges*, PhD Thesis EPFL N°7044, 2016.~~

[12] C. Campion, K. Fila, Q. van Maarschalkerwaart et al. – *Eurocode 1 Loads. Railway loads, fatigue assessment*. Background document UIC, report SBB Bau GD Ib/Br-JJR, Switzerland, 1992.

[13] G. Bianchi – *European traffic on road bridges and recalibration of damage equivalence factor for fatigue verification*, VSS "Route et trafic", Nr. 4-5, April/May 2020.

[14] A. Nussbaumer, J. Oliveira Pedro, C. Baptista, M. Duval – *Chapter 47 – Fatigue Damage Factor Calibration for Long-Span Cable-Stayed Bridge Decks* – In *Mechanical Fatigue of Metals*, Ed. Springer, 2019.

[15] J. Kalin, A. Znidaric, A. Anzlin, M. Kreslin – *Measurements of bridge dynamic amplification factor using bridge weigh-in-motion data*, Structure and Infrastructure Engineering 0 (2021) 1-13.

[16] J. Maljaars, D. Leonetti, S.B. Hashemi, H.H. Snijder – *Systematic derivation of safety factors for the fatigue design of steel bridges*, Structural Safety, Vol. 97, 2022, DOI 10.1016/j.strusafe.2022.102229.

[17] Joint committee of structural safety - JCSS Probabilistic Model Code, ISBN 978-3-909386-79-6 URL: https://www.jcss-lc.org/jcss-probabilistic-model-code/

[18] D. Leonetti, J. Maljaars, H. H. Snijder – *Fitting fatigue test data with a novel SN curve using frequentist and Bayesian inference*, International Journal of Fatigue 105 (2017): 128-143.

[19] D. Leonetti, J. Maljaars, H. H. Snijder – *Probabilistic fatigue resistance model for steel welded details under variable amplitude loading–Inference and uncertainty estimation*, International Journal of Fatigue 135 (2020): 105515

[20] SETRA, *Eurocodes 3 and 4 – Application to steel-concrete composite road bridges*. Paris, 2007.

[21] ECCS TC6 fatigue and fracture. 2020. *From Assessment to Best Practice. A Collection of Historical Fatigue Damage Cases in Steel and Composite Bridges (1st edition).* Publication n° 139. ISBN 978-92-9147-140-9. Brussels: ECCS European Convention for Constructional Steelwork.

[22] J. Oliveira Pedro; A. Reis – *Nonlinear analysis of composite steel-concrete cable-stayed bridges*, Engineering Structures 32 (9), Sep. 2010, pp. 2702-2716.

15.2 Bibliographie

~~[23] J. Maljaars, R. Steenbergen, L. Abspoel, H. Kolstein – *Safety Assessment of Existing Highway Bridges and Viaducts*, IABSE - Structural Engineering International Vol. 22 – Issue 1, January 2012, pp.112-120.~~

[24] G. Sedlacek, et al – *Background document to EN 1991- Part 2 – Traffic loads for road bridges and consequences for the design*, JRC Scientific and Technical Reports, 2008.

[25] H. Ludescher – *Berücksichtigung von dynamischenVerkehrslasten beim tragsicherheitsnachweis von Strassenbrücken*, PhD Thesis EPFL N°2894, 2003.

[26] Vrouwenvelder, T., and et al. *Reliability background of the Eurocodes. JRC Technical Report,* n° 209. JRC Technical Report. Ispra, Italy: Joint Research Center, 2024.

[27] B. M. Imam, M. K. Chryssanthopoulos, *A review of metallic bridge failure statistics*, 5th Int. Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (IABMAS'10). Philadelphia, USA, 2010.

[28] M. Hirt, R. Bez, A. Nussbaumer – *Construction métallique (TGC volume 10)*, PPUR, 2015.

[29] J-P. Lebet, M. Hirt – *Ponts en acier (TGC volume 12)*, PPUR, 2009.

[30] A. Bruls – *Résistance des ponts soumis au trafic routier - Modélisation des charges - Réévaluation des ouvrages*, PhD Thesis, Université de Liège, 1995.

[31] A. Nussbaumer, H. P. Günther – *Stahlbaukalender 2006: Grundlagen und Erläuterung der neuen Ermüdungnachweise nach Eurocode 3*, 2006.

[32] T. Meystre, M. A. Hirt – *Evaluation de ponts routiers existants avec un modèle de charge de trafic actualisé*, Centre de recherche - ICOM EPF-Lausanne, Office fédéral des routes OFROU, 2006.

~~[33] J. Oliveira Pedro, A. J. Reis, C. Baptista – *High Strength Steel S690 in highway bridges*, Stahlbau vol. 87, Issue 6, 2018.~~

15.3 Références normatives

[34] EN 1991-2, *Eurocode 1 – Actions on structures - Part 2: Traffic loads on bridges*, European committee for standardization, 2003.

[35] prEN1992-1-1, *Eurocode 2 – Design of concrete structures – Part 1-1: General rules, rules for buildings, bridges and civil engineering structures*, Final document. European Committee for Standardization – 2020.

[36] EN 1993-1-9, *Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 1-9: Fatigue*, European committee for standardization, 2005.

[37] prEN1993-1-9, *Eurocode 3 – Design of steel structure – Part 1-9: Fatigue*, Final document, European committee for standardization, 2021.

[38] prEN1993-1-11, *Eurocode 3 – Design of steel structure – Part 1-11: Design of structures with tension components*, Final draft, European committee for standardization, 2021.

[39] EN 1993-2, *Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 2: Steel Bridges*, European committee for standardization, 2006.

[40] G. Bianchi, J. Maljaars, A. Nussbaumer, J. Oliveira Pedro, C. Vaccari – Background document for prEN 1993-2, *Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 2: Steel Bridges*, European committee for standardization, 2022.

[41] prEN 1993-2, *Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 2: Steel Bridges*, European committee for standardization, 2022.

[42] prEN1994-2 – *Design of Composite Steel and Concrete Structures – Part 2: General rules and rules for bridges*, Final draft, European Committee for Standardization – 2021.

[43] Swiss standard SIA 261 – *Actions sur les structures porteuses*, Société suisse des ingénieurs et des architectes, 2003.

[44] Swiss standard SIA 261 – *Actions sur les structures porteuses*, Société suisse des ingénieurs et des architectes, 2020.

[45] Swiss standard SIA 263 – *Construction en acier*, Société suisse des ingénieurs et des architectes, 2003.

[46] Swiss standard SIA 263 – *Construction en acier*, Société suisse des ingénieurs et des architectes, 2013.

[47] Swiss standard SIA 269/1 – *Structures existantes - Actions*, Société suisse des ingénieurs et des architectes, 2011.

[48] British Standard BS7608: 2014. Guide to fatigue design and assessment of steel products. BSI; 2014.

16 Annexe A: Bref historique et limites de la norme suisse actuelle

16.1 Simulations précédentes

La documentation utilisée pour la définition des courbes λ_1 actuelles de la SIA 261 est incomplète, il n'existe que la documentation D076 [4], qui contient les formules correspondant aux différentes courbes λ_1 pour les voies normales et étroites. Il reste cependant différentes notes rédigées entre 1979 et 1985 qui ont été étudiées, mais il existe des incohérences entre elles concernant les trafics, types de trains et les systèmes statiques utilisés. Une autre limite de cette information est que les trafics et types de trains adoptés à l'époque pour effectuer les simulations sont maintenant âgés d'au moins 40 ans et ne sont plus adaptés.

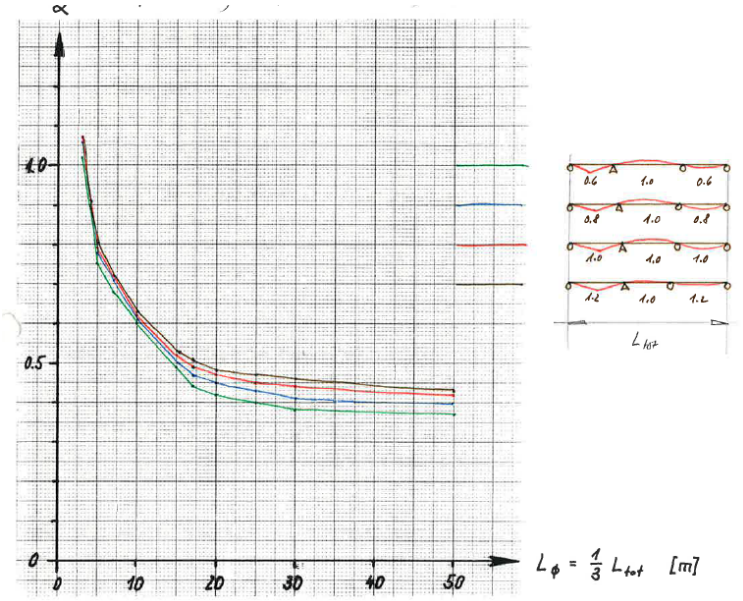


Figure 16.1 – Exemple de graphique dessiné trouvé dans la documentation et ayant servi pour la définition des courbes λ_1 de la SIA 261 (extrait de [6]).

Comme le montre la figure précédente, le calcul de chaque point de la courbe λ_1 a été fait avec un calcul manuel limitant le nombre de systèmes statiques et les types de trains. Aucune analyse de sensibilité des paramètres n'a été faite car ils ont été limités par le temps nécessaire pour effectuer un calcul manuel.

Ce travail permet non seulement de mettre à jour le type de trafic avec le trafic actuel et futur, mais aussi de compléter les simulations avec un plus grand nombre de lignes d'influence, de combinaisons de trafic et de donner une meilleure correspondance avec le trafic réel qui n'était pas pris en compte à l'époque.

Au final, en étudiant le calcul précédent, il est possible de remarquer que le travail pour obtenir les valeurs λ_1, nécessaires pour obtenir les courbes λ_1, a été limité à environ 10 longueurs de travées, 5-6 systèmes statiques et un seul trafic ferroviaire pour un total d'environ 60 combinaisons possibles.

Les algorithmes développés par l'EPFL sont basés sur 41 longueurs de travées, 54 systèmes statiques et 42 trafics ferroviaires, soit un total d'environ 93'000 combinaisons. L'avantage des algorithmes est également que toutes ces combinaisons ont été calculées en seulement 730 heures de simulations, ce qui correspond à moins d'une semaine de calcul avec 5 ordinateurs.

16.2 Corrélation entre les facteurs λ_1 et λ_2

Les travaux précédents de l'EPFL [40] ont montré comment le volume du trafic peut être correctement pris en compte par le facteur λ_2 selon la norme EN 1993-2 pour le trafic routier et ferroviaire à voie normale. Le facteur λ_1 pour le trafic ferroviaire à voie étroite devrait considérer uniquement la composition du trafic et la géométrie des trains et devrait être calibré sur un volume de trafic de référence correspondant à celui du facteur λ_2 comme pour les courbes ferroviaires à voie normale.

Or ce n'est pas ce qui a été fait dans la norme SIA, et ses mises à jour, pour le trafic ferroviaire à voie étroite. Comme représenté dans la figure suivante, la méthode lambda de la norme SIA 263:2003 contient trois catégories de trafic mais sans référer à un volume de trafic spécifique.

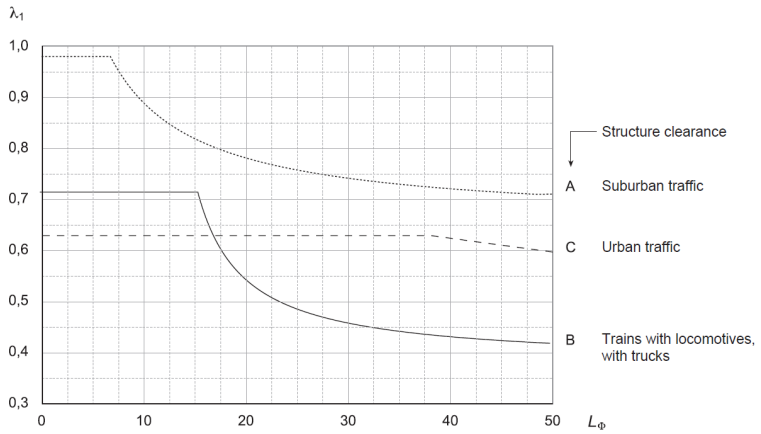


Figure 16.2 – Courbes λ_1 pour le trafic ferroviaire à voie étroite de la norme SIA 263, 2003 (extraites de [45]).

La méthode permettait de prendre en compte le volume de trafic mais en faisant varier le modèle de charge, conformément à la figure ci-dessous :

Table 20: Indicative values of traffic volume on narrow gauge railway lines (365 days per year)

Load Model	Number of trains per day and per track
4	250
5	50

Figure 16.3 – Modèles de charges de fatigue à appliquer SIA 261:2003 (extrait de [43]).

Cette façon de procéder est conceptuellement incorrecte car le modèle de charge devrait correspondre exactement à celui utilisé dans les simulations pour obtenir les courbes λ_1. De plus, les modèles de charge ont été définis en fonction du nombre de trains par jour, mais en ne tenant pas compte du poids par essieu du train d'une ligne spécifique. Cette méthodologie ne permet pas d'avoir de cas intermédiaires et donc d'adapter la vérification en fonction du volume de trafic réel et du type de trains.

Ceci a également été utilisé pour le trafic routier où le facteur λ_2 est absent et les courbes ont été définies pour quatre types de routes différents, Figure 16.4, sans possibilité de corriger le facteur en fonction du volume de trafic, mélangeant le concept de type de trafic (géométries des véhicules et charges moyennes par essieu) avec le volume de trafic (nombre des cycles).

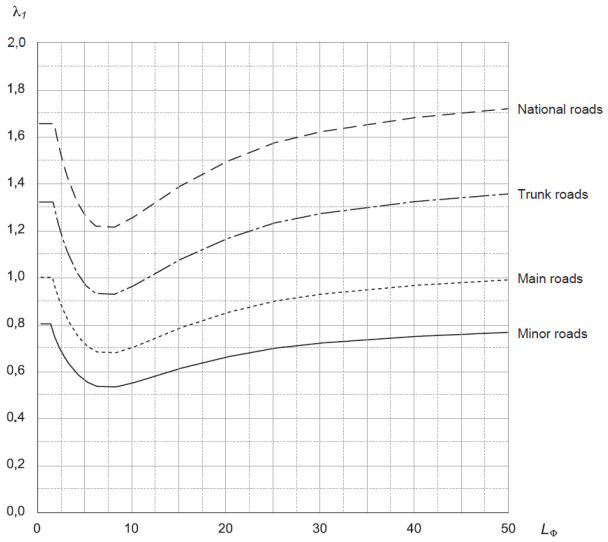


Figure 16.4 – Courbes du facteur partiel λ_1 pour le trafic routier de la norme SIA 263:2003 (extraites de [45]).

Cette façon de définir le facteur λ est assez paradoxale, car on peut constater par exemple qu'un trafic ferroviaire sur voie étroite de 200 trains/jour sur une période de 50 ans conduit à des résultats différents de ceux pour trafic de 100 trains/jour sur une période de 100 ans.

Une tentative de correction de cette incohérence a effectuée dans la version de la SIA 261: 2014, qui elle contient le facteur λ_2. Pour les courbes λ_1 des ponts ferroviaires à voie étroite, de nombreux changements ont été mis en œuvre dans cette édition de la norme, mais les nouvelles courbes ne sont pas les résultats de nouvelles simulations. Elles sont basées sur les anciennes simulations, avec une adaptation des courbes en utilisant un facteur de correction du volume de trafic λ_2 (en admettant comme base le volume de trafic de référence de chaque courbe). Les simulations plus récentes de l'EPFL montrent comment une variation du type de trafic conduit à une variation des courbes λ_1 mais correspond plutôt une translation verticale, la forme de la courbe restant similaire. Ceci peut être expliqué par le fait que les géométries et les répartitions des charges sont assez similaires (à la différence par exemple du trafic routier, où les géométries des camions dépendent par exemple du pays). Le comportement incohérent des courbes actuelles peut provenir d'hypothèses simplificatrices, telles que la composition du trafic ferroviaire utilisée dans les calculs effectués il y a 40 ans.

Notons encore qu'en ce qui concerne le trafic routier, cette édition de la norme contient encore une incohérence car le facteur λ_2 utilise une charge moyenne de référence Q_0 de 320 kN et un nombre total de véhicules par an N_0 qui est le même pour les quatre courbes λ_1. Or ces courbes ont probablement été obtenues avec des valeurs de référence différentes (en supposant aussi que les courbes sont les mêmes que celles de 2003, pour lesquels ces valeurs de référence n'existaient pas).

La version actuellement en vigueur de la SIA 261: 2020 reprend, pour ce qui est de la fatigue des ponts ferroviaires à voie étroite, exactement la précédente (SIA 261: 2014).

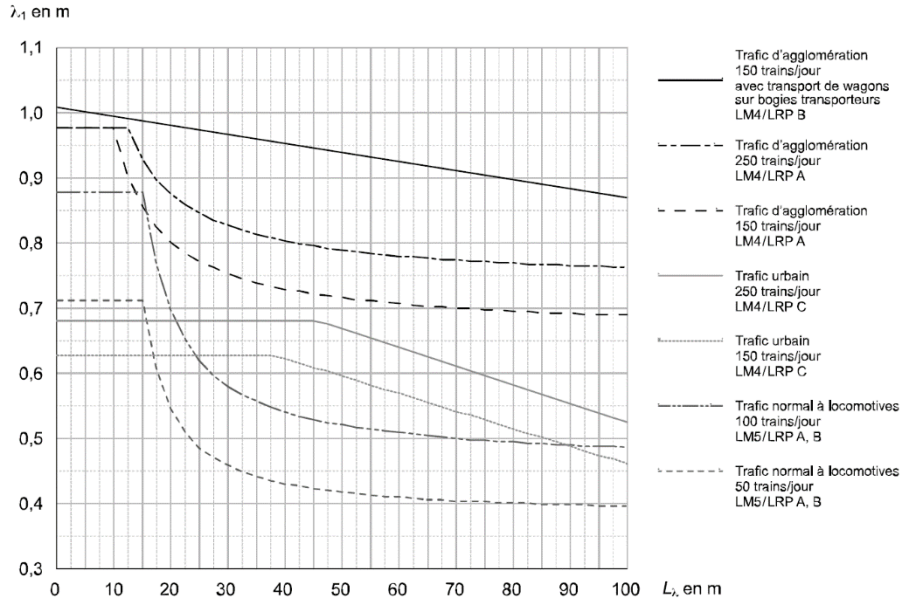


Figure 16.5 – Courbes du facteur partiel λ_1 de la SIA 261:2020 (extrait de [44]).

$$\lambda_2 = \left(\frac{V_{obs}}{V_0}\right)^{\frac{1}{m}}$$

Toutefois $\lambda_2 \geq 1{,}0$.

Tableau 79 Valeurs de référence du volume du trafic V_0 sur une ligne à voie étroite

Modèle de trafic	Nombre de trains/jour	V_0 en t/an/voie
Trafic d'agglomération	250	$10{,}6 \cdot 10^6$
	150	$6{,}3 \cdot 10^6$
Trafic urbain	250	$5{,}7 \cdot 10^6$
	150	$3{,}4 \cdot 10^6$
Trafic normal à locomotives, avec ou sans transport de wagons sur trucs	100	$6{,}4 \cdot 10^6$
	50	$3{,}2 \cdot 10^6$

Figure 16.6 – Extrait des valeurs de référence du facteur partiel λ_2 de SIA 261:2020 (extrait de [44]).

La méthode actuelle est assez incohérente et complique le travail des ingénieurs pour la définition du modèle d'un trafic correct ; en fait, il arrive souvent d'avoir une catégorie entre deux et les ingénieurs ont tendance à appliquer le modèle qui leur semble plus conservateur.

Cette définition avec trois modèles de trafic ne donne pas une idée du poids moyen par essieu qui devrait être le paramètre principal d'une vérification à la fatigue. L'utilisation d'un nombre différent de trains dans le facteur λ_1 est une répétition car il est directement pris en compte dans le facteur λ_2.

Un autre problème de la méthode actuelle est que les courbes ont été définies avec un fractile inconnu, donc en réeffectuant des simulations et en calibrant toutes les courbes avec le même volume de trafic, la superposition n'est pas parfaite. Dans la figure suivante les courbes ont été regroupées avec des couleurs similaires (rouge pour le trafic d'agglomération, bleu pour le trafic urbain et vert pour le trafic normal à locomotives).

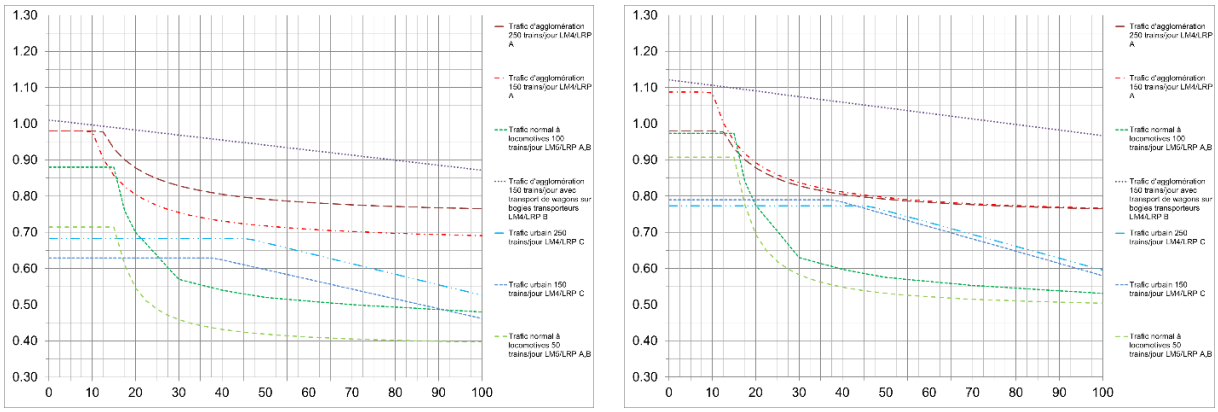


Figure 16.7 – Courbes du facteur partiel λ_1 de la norme SIA 261:2020 (à gauche) et recalibrées sur le même volume de trafic de 10,6 Mio tonnes/an (à droit).

La comparaison montre comment les courbes de la même catégorie de trafic ne sont pas parfaitement superposées. Cela signifie que pour le calcul du facteur λ, par exemple pour un trafic avec 150 trains/jour pendant 100 ans (5'475'000 trains circulés en total), les résultats sont différents du calcul d'un trafic avec 250 trains/jour pendant 60 ans (5'475'000 trains circulés en total), même si le type de trafic, le nombre et le type de trains sont identiques et le nombre total de trains circulé est exactement le même.

Le comportement incorrect de ces courbes a été confirmé par la mise à jour de la norme SIA 261, puisque les courbes du trafic ferroviaire à voie étroite sont toujours basées sur les courbes du trafic ferroviaire à voie normale présentées dans la norme SIA 261:2003 qui a été remplacée par une nouvelle courbe en 2013, comme le montre la figure suivante :

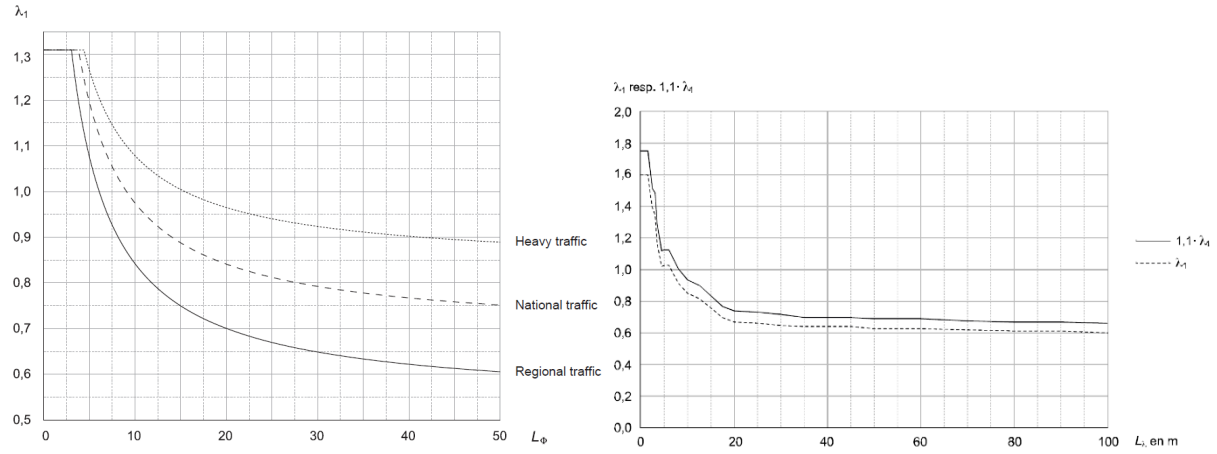


Figure 16.8 – Courbes du facteur partiel λ_1 de la norme SIA 261 pour le trafic ferroviaire à voie standard, comparaison 2003 (à gauche) et 2020 (à droite).

16.3 Incohérence de la norme suisse

La vérification pour le trafic ferroviaire à voie normale montre une certaine incohérence entre la norme SIA 261 et la norme EN 1993-2 et surtout entre le calcul pour les nouvelles structures définies dans la norme SIA 261 et pour les structures existantes définies dans la norme SIA 269/1. Ces deux normes ne sont pas l'objet du présent rapport mais les incohérences sont mentionnées ci-dessous :

- Pour le calcul du facteur λ du trafic ferroviaire à voie étroite et du trafic ferroviaire à voie normale, la même méthode devrait être appliquée. En effet, la différence des géométries des wagons, de poids des essieux et de volumes de trafic devrait conduire uniquement à des courbes λ_1 différentes et à des valeurs de volume de référence V_0 du facteur λ_2 différentes mais conservant

la même procédure ;

- Le calcul du facteur λ_1 pour le trafic ferroviaire à voie normale n'inclut pas de références aux différents volumes de trafic, parce que justement le volume du trafic est correctement pris en compte par le facteur λ_2. Cette procédure devrait être reprise aussi pour le facteur λ_1 du trafic ferroviaire à voie étroite ;
- Le calcul du facteur λ_2 pour le trafic ferroviaire à voie normale de la norme SIA 269/1 permet d'avoir une valeur inférieure à 1.00, parce que dans le cas où l'on a des données du trafic on peut réduire le volume total sur l'ouvrage. Cela représente un grand avantage surtout dans le cas où l'on a des données sur le volume de trafic passé, probablement inférieur au volume de référence utilisé dans le calcul du facteur λ_1. Le trafic ferroviaire à voie étroite de la norme SIA 269/1 ou le trafic ferroviaire à voie normale de la SIA 261 (nouvelle structure) ne permettent pas de réduire ce facteur, même si le volume est beaucoup plus faible. La norme EN 1993-2 permet une réduction du facteur λ_2 ;
- Le calcul du facteur λ_2 pour le trafic ferroviaire à voie normale est également donné dans la figure 29 de la norme SIA 261 et dans le paragraphe G.3.2 de la norme SIA 261. Cette approche n'est pas conforme au trafic ferroviaire à voie étroite et l'utilisation de seulement 2 classes avec un volume minimal de 25 Mio tonnes/an (défini par la classe 1) ne reflète pas les volumes du système ferroviaire suisse. L'Eurocode permet d'aller au-dessous de ces 25 Mio tonnes/an ;
- Le calcul du facteur λ_2 pour le trafic ferroviaire à écartement standard de la norme SIA 269/1 considère dans le calcul le volume de trafic futur alors que le calcul de λ_3 considère la durée de vie totale de la structure. Cela surestime le volume de trafic passé, dans le cas dont l'on a à disposition les données du volume du trafic passé il faudrait le considérer ;
- La valeur m pour le calcul de λ_2 et λ_3 dans la norme SIA 269/1 est fixée égale à 5 alors que la norme SIA 261:2020 admet une utilisation moins conservatrice, utilisant le facteur m=7 pour les armatures d'une structure en béton et m=8 pour les goujons en cisaillement. De plus, pour le calcul de λ_4, la norme SIA 269/1 se réfère à la SIA 261, permettant donc une valeur m=7 ou 8 ;
- Pour la vérification avec le cumul des dommages d'une structure avec trafic ferroviaire à voie étroite, la norme SIA 261 se réfère à la vérification pour le trafic ferroviaire à voie normale, qui se réfère à son tour à la composition standard du trafic avec un poids par essieu ≤ 22,5 t de la norme EN 1991-2. Cette composition n'a rien à voir avec les voies étroites.

Même si les courbes λ_1 du trafic ferroviaire à écartement normal semblent plus fiables, il reste des points qui devraient être mieux définis car ils manquent de cohérence :

- La norme EN 1991-2, dans l'annexe D.3, définit trois types de trafic : « Standard traffic mix with axles ≤ 22,5 t » ; « Heavy traffic mix with 25t axles » ; « Light traffic mix with axles ≤ 22,5 t ». La norme EN 1993-2 fournit les courbes λ_1 pour : « EC standard mix » ; « Express multiple units and underground Type 9» ; « Express multiple units and underground Type 10»; « Rail traffic with 25t axles ». Les catégories des deux normes doivent correspondre ;
- Le comportement des courbes conduise à la conclusion que les lignes d'influence utilisées pour le calcul étaient limitées à quelques-unes (peut-être une seule), ceci est dû au fait que le travail était limité par le calcul manuel.

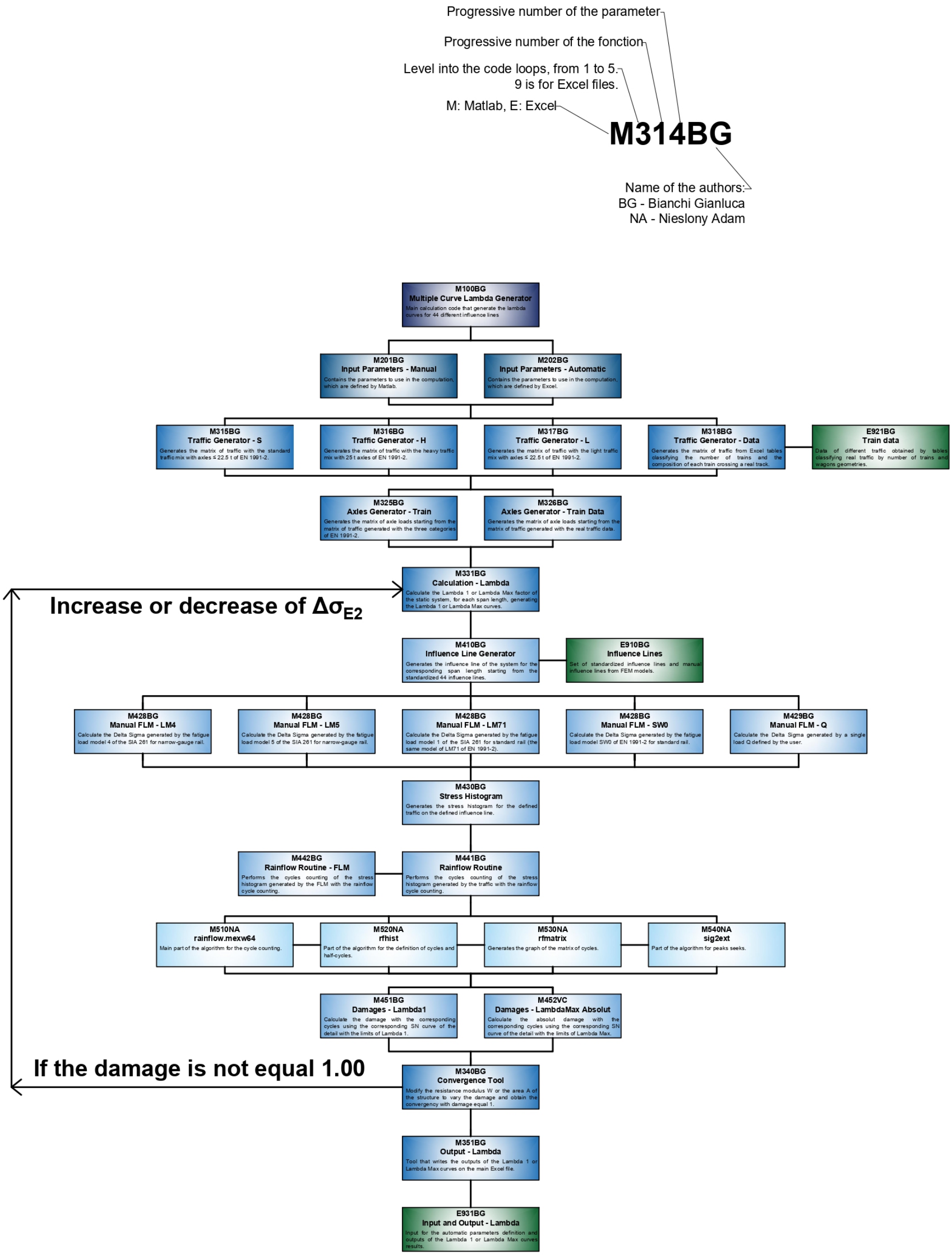
17 Annexe B: Algorithmes pour le trafic ferroviaire

Cette annexe décrit l'algorithme utilisé pour les calculs et chacun de ses modules :

- **M100BG_MultipleCurveLambdaGenerator** : Code de calcul principal qui génère les courbes lambda pour 54 lignes d'influence différentes.
- **M101BG_TimeEvolutionOfDamage** : Évolution des dommages pour les lignes d'influence unique au fil des années et avec la variation simulée du trafic.
- **M102BG_MultipleILDamageCalculation** : Calcul de l'endommagement D ou de la résistance de détail nécessaire $\Delta\sigma_{E2}$ de différentes lignes d'influence définies manuellement à partir d'un logiciel FEM.
- **M201BG_InputParameters_Manual** : Contient les paramètres à utiliser dans le calcul, qui sont définis par MATLAB.
- **M202BG_InputParameters_Automatic** : Contient les paramètres à utiliser dans le calcul, qui sont définis par Excel.
- **M210BG_InterpolationTool** : Interpolation des résultats finaux pour obtenir les points des courbes λ_1 chaque mètre.
- **M211BG_CurveFittingTool** : Calcul préliminaire des courbes proposées λ_1 s'ajustant aux résultats finaux des simulations.
- **M212BG_Manual_3PointsFitting** : Outil qui aide à adapter les courbes λ_1 proposées en modifiant manuellement les résultats de M211BG_CurveFittingTool.
- **M315BG_TrafficGenerator_Train_S** : Génère la matrice de trafic avec la combinaison de trafic standard avec des essieux ≤ 22,5 t de l'EN 1991-2.
- **M316BG_TrafficGenerator_Train_H** : Génère la matrice de trafic avec le mélange de trafic lourd avec des essieux de 25 t de l'EN 1991-2.
- **M317BG_TrafficGenerator_Train_L** : génère la matrice de trafic avec le mélange de trafic léger avec essieux ≤ 22,5 t de l'EN 1991-2.
- **M318BG_TrafficGenerator_Train_Data** : Génère la matrice de trafic à partir de Tableaux Excel classant le nombre de trains et la composition de chaque train traversant une voie réelle.
- **E921BG_TrainData** : Données des différents trafics obtenues par des Tableaux classant le nombre de trains et la composition de chaque train.
- **M325BG_AxlesGenerator_Train** : Génère la matrice des charges par essieu à partir de la matrice du trafic générée avec les trois catégories de l'EN 1991-2.
- **M326BG_AxlesGenerator_Train_Data** : Génère la matrice des charges par essieu à partir de la matrice du trafic générée avec les données réelles du trafic.
- **M331BG_Calculation_Lambda** : Calculer le facteur Lambda 1 ou Lambda max du système statique, pour chaque longueur de portée, en générant les courbes Lambda 1 ou Lambda Max.
- **M340BG_ConvergenceTool** : Modifier le module de résistance W ou la surface A de la structure pour faire varier l'endommagement et obtenir la convergence avec un endommagement égal à 1.
- **M351BG_Output_Lambda** : Outil qui écrit les sorties des courbes Lambda 1 ou Lambda Max

sur le fichier Excel principal.

- **M410BG_InfluenceLineGenerator** : Génère la ligne d'influence du système pour la longueur de portée correspondante à partir des 44 lignes d'influence normalisées.
- **M428BG_ManuelFLM_LM4** : Calculer le Delta Sigma généré par le modèle de charge de fatigue 4 de la SIA 261 pour les rails à voie étroite.
- **M428BG_ManualFLM_LM5** : Calculer le Delta Sigma généré par le modèle de charge de fatigue 5 de la SIA 261 pour les rails à voie étroite.
- **M428BG_ManualFLM_LM71**: Calculer le Delta Sigma généré par le modèle de charge de fatigue 1 de la SIA 261 pour le rail standard (le même modèle que LM71 de l'EN 1991-2).
- **M428BG_ManualFLM_SW0** : Calculer le Delta Sigma généré par le modèle de charge de fatigue SW0 de l'EN 1991-2 pour le rail standard.
- **M429BG_ManualFLM_Q** : Calcule le Delta Sigma généré par une charge unique Q définie par l'utilisateur.
- **M429BG_ManualFLM_Q2** : Calcule le Delta Sigma généré par deux charges simples Q définies par l'utilisateur.
- **M430BG_StressHistogram** : Génère l'histogramme des contraintes pour le trafic défini sur la ligne d'influence définie.
- **M441BG_RainflowRoutine** : Effectue le comptage des cycles de l'histogramme des contraintes générées par le trafic avec le comptage des cycles du rainflow.
- **M442BG_RainflowRoutine_FLM** : Effectue le comptage des cycles de l'histogramme de stress généré par le FLM avec le comptage des cycles de rainflow.
- **M451BG_Damages_Lambda1** : Calculer le dommage avec les cycles correspondants en utilisant la courbe SN correspondante du détail avec les limites de Lambda 1.
- **M452BG_Damages_LambdaMax** : Calculer le dommage absolu avec les cycles correspondants en utilisant la courbe SN correspondante du détail avec les limites de Lambda Max.
- **M510NA_rainflow** : Partie principale de l'algorithme pour le comptage des cycles.
- **M520NA_rfhist** : Partie de l'algorithme pour la définition des cycles et demi-cycles.
- **M530NA_rfmatrix** : Génère le graphe de la matrice des cycles.
- **M540NA_sig2ext** : Partie de l'algorithme pour les pics de recherche.


Progressive number of the parameter
Progressive number of the fonction
Level into the code loops, from 1 to 5.
9 is for Excel files.
M: Matlab, E: Excel
M314BG
Name of the authors:
BG - Bianchi Gianluca
NA - Nieslony Adam
M100BG
Multiple Curve Lambda Generator
Main calculation code that generate the lambda curves for 44 different influence lines
M201BG
Input Parameters - Manual
Contains the parameters to use in the computation, which are defined by Matlab.
M202BG
Input Parameters - Automatic
Contains the parameters to use in the computation, which are defined by Excel.
M315BG
Traffic Generator - S
Generates the matrix of traffic with the standard traffic mix with axles ≤ 22.5 t of EN 1991-2.
M316BG
Traffic Generator - H
Generates the matrix of traffic with the heavy traffic mix with 25 t axles of EN 1991-2.
M317BG
Traffic Generator - L
Generates the matrix of traffic with the light traffic mix with axles ≤ 22.5 t of EN 1991-2.
M318BG
Traffic Generator - Data
Generates the matrix of traffic from Excel tables classifying the number of trains and the composition of each train crossing a real track.
E921BG
Train data
Data of different traffic obtained by tables classifying real traffic by number of trains and wagons geometries.
M325BG
Axles Generator - Train
Generates the matrix of axle loads starting from the matrix of traffic generated with the three categories of EN 1991-2.
M326BG
Axles Generator - Train Data
Generates the matrix of axle loads starting from the matrix of traffic generated with the real traffic data.
M331BG
Calculation - Lambda
Calculate the Lambda 1 or Lambda Max factor of the static system, for each span length, generating the Lambda 1 or Lambda Max curves.
Increase or decrease of Δσ E2
M410BG
Influence Line Generator
Generates the influence line of the system for the corresponding span length starting from the standardized 44 influence lines.
E910BG
Influence Lines
Set of standardized influence lines and manual influence lines from FEM models.
M428BG
Manual FLM - LM4
Calculate the Delta Sigma generated by the fatigue load model 4 of the SIA 261 for narrow-gauge rail.
M428BG
Manual FLM - LM5
Calculate the Delta Sigma generated by the fatigue load model 5 of the SIA 261 for narrow-gauge rail.
M428BG
Manual FLM - LM71
Calculate the Delta Sigma generated by the fatigue load model 1 of the SIA 261 for standard rail (the same model of LM71 of EN 1991-2).
M428BG
Manual FLM - SW0
Calculate the Delta Sigma generated by the fatigue load model SW0 of EN 1991-2 for standard rail.
M429BG
Manual FLM - Q
Calculate the Delta Sigma generated by a single load Q defined by the user.
M430BG
Stress Histogram
Generates the stress histogram for the defined traffic on the defined influence line.
M442BG
Rainflow Routine - FLM
Performs the cycles counting of the stress histogram generated by the FLM with the rainflow cycle counting.
M441BG
Rainflow Routine
Performs the cycles counting of the stress histogram generated by the traffic with the rainflow cycle counting.
M510NA
rainflow.mexw64
Main part of the algorithm for the cycle counting.
M520NA
rfhist
Part of the algorithm for the definition of cycles and half-cycles.
M530NA
rfmatrix
Generates the graph of the matrix of cycles.
M540NA
sig2ext
Part of the algorithm for peaks seeks.
M451BG
Damages - Lambda1
Calculate the damage with the corresponding cycles using the corresponding SN curve of the detail with the limits of Lambda 1.
M452VC
Damages - LambdaMax Absolut
Calculate the absolut damage with the corresponding cycles using the corresponding SN curve of the detail with the limits of Lambda Max.
If the damage is not equal 1.00
M340BG
Convergence Tool
Modify the resistance modulus W or the area A of the structure to vary the damage and obtain the convergency with damage equal 1.
M351BG
Output - Lambda
Tool that writes the outputs of the Lambda 1 or Lambda Max curves on the main Excel file.
E931BG
Input and Output - Lambda
Input for the automatic parameters definition and outputs of the Lambda 1 or Lambda Max curves results.

18 Annexe C: Résumé des lignes d'influence et de la longueur déterminante L_λ correspondante

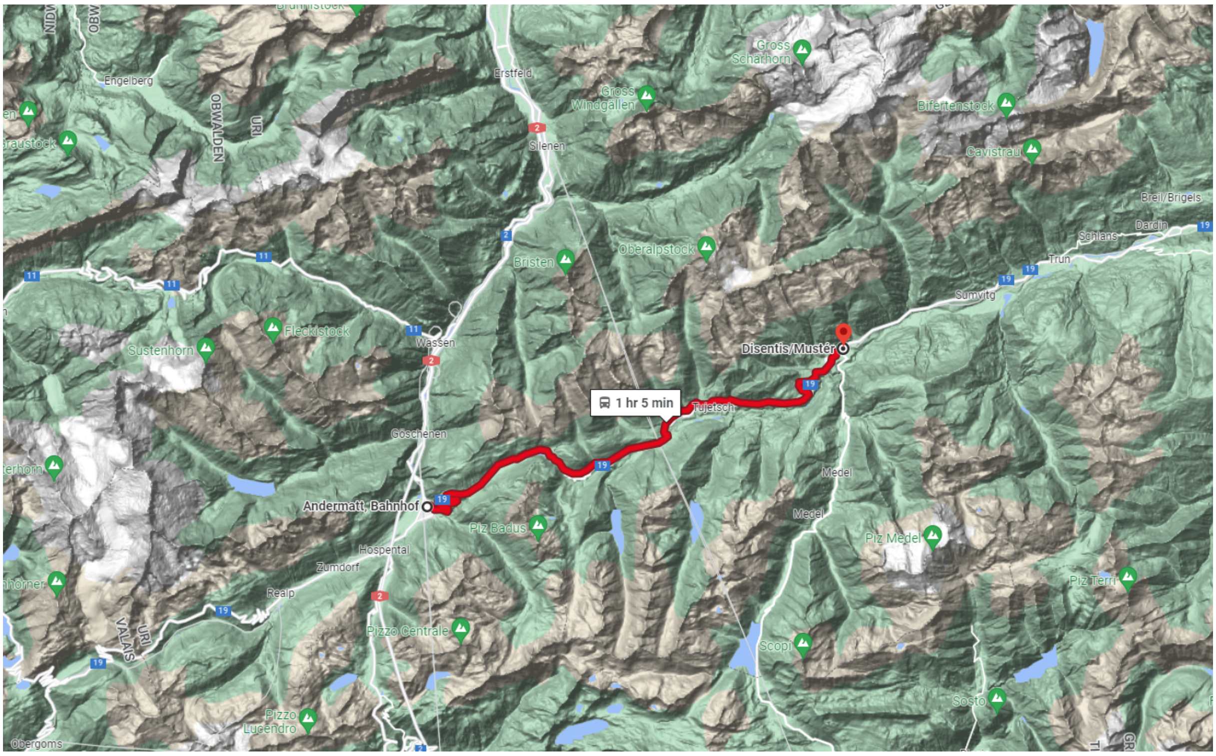
Influence lines Supports: | Detail location: O Critical length L_λ: ( )		1S L	2S L L	2SH L L/2	3S L L L	3SH L/2 L L/2	1D L	1E L
MM	Midspan bending moment	1S-MM (1.00·L)	2S-MM (1.00·L)	2SH-MM (1.00·L)	3S-MM (1.00·L)	3SH-MM (1.00·L)	1D-MM (1.00·L)	1E-MM (1.00·L)
MV	Midspan shear force	1S-MV (0.40·L)	2S-MV (0.40·L)	2SH-MV (0.40·L)	3S-MV (0.40·L)	3SH-MV (0.40·L)	1D-MV (0.40·L)	1E-MV (0.40·L)
IM	Intermediate bending moment	1S-IM (1.00·L)	2S-IM (1.00·L)	2SH-IM (1.00·L)	3S-IM (1.00·L)	3SH-IM (1.00·L)	-	-
IV	Intermediate shear force	1S-IV (1.00·L)	2S-IV (1.00·L)	2SH-IV (1.00·L)	3S-IV (1.00·L)	3SH-IV (1.00·L)	-	-
SM	Support bending moment	-	2S-SM (1.00·L)	2SH-SM (0.75·L)	3S-SM (1.00·L)	3SH-SM (0.75·L)	-	-
SV	Support shear force	1S-SV (1.00·L)	2S-SV (1.00·L)	2SH-SV (1.00·L)	3S-SV (1.00·L)	3SH-SV (1.00·L)	1D-SV (1.00·L)	-
LM	Lateral midspan bending moment	-	-	2SH-LM (0.50·L)	3S-LM (1.00·L)	3SH-LM (0.50·L)	-	-
LV	Lateral midspan shear force	-	-	2SH-LV (0.20·L)	3S-LV (0.40·L)	3SH-LV (0.20·L)	-	-
EM	Fixed support bending moment	-	-	-	-	-	1D-EM (1.00·L)	1E-EM (1.00·L)
EM	Fixed support shear force	-	-	-	-	-	1D-EV (1.00·L)	1E-EV (1.00·L)
CR	Central reaction	-	2S-CR (2.00·L)	2SH-CR (1.50·L)	3S-CR (2.00·L)	3SH-CR (1.50·L)	-	-
LR	Lateral reaction	1S-LR (1.00·L)	2S-LR (1.00·L)	2SH-LR (1.00·L)	3S-LR (1.00·L)	3SH-LR (0.50·L)	-	-

19 Annexe D: Carte des différentes lignes ferroviaires

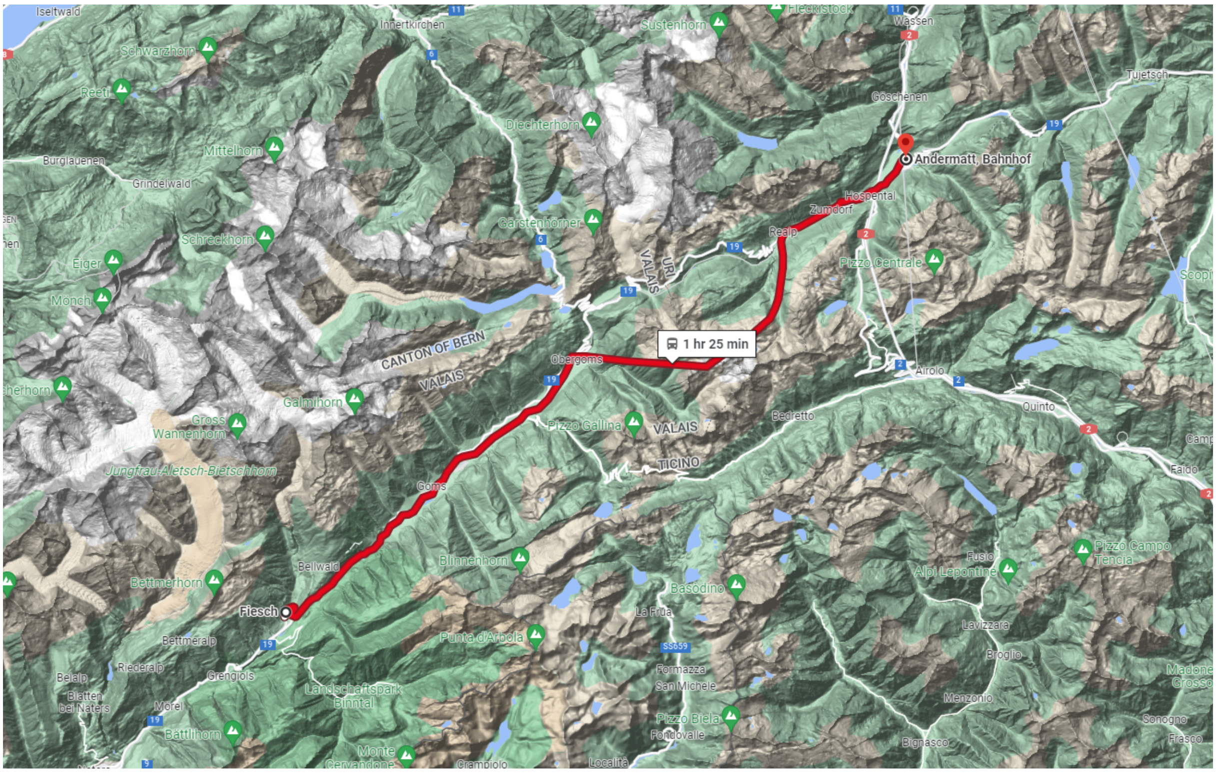
Cette annexe montre les cartes des différentes lignes extraites de Google Maps.

19.1 Matterhorn Gotthard Bahn

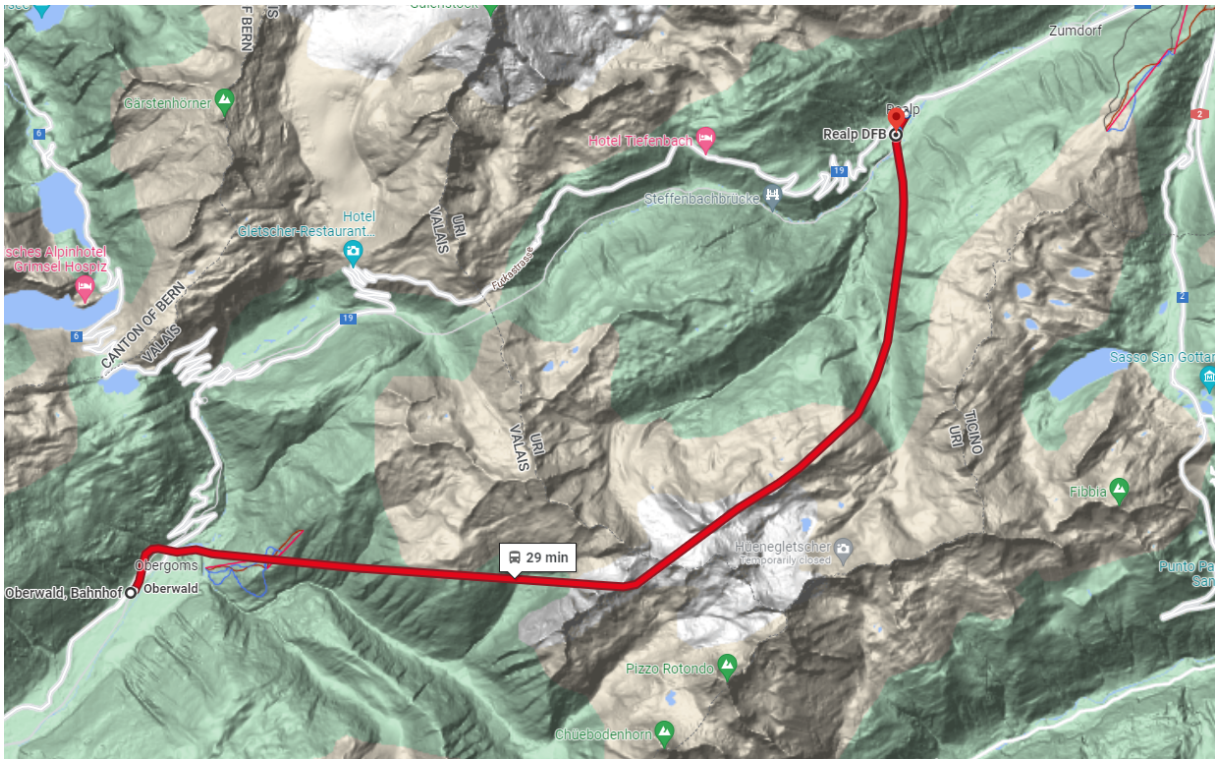
19.1.1 Andermatt-Dieni-Disentis



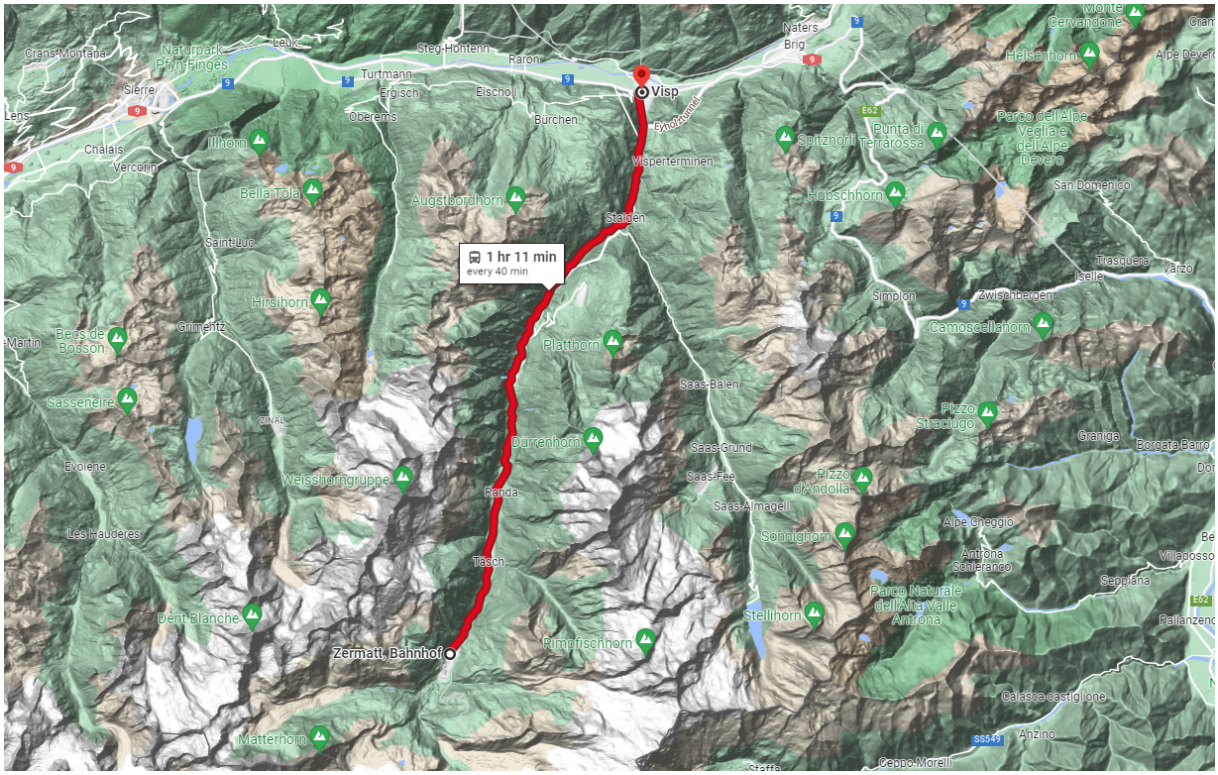
19.1.2 Fiesch-Oberwald-Andermatt



19.1.3 Oberwald-Realp

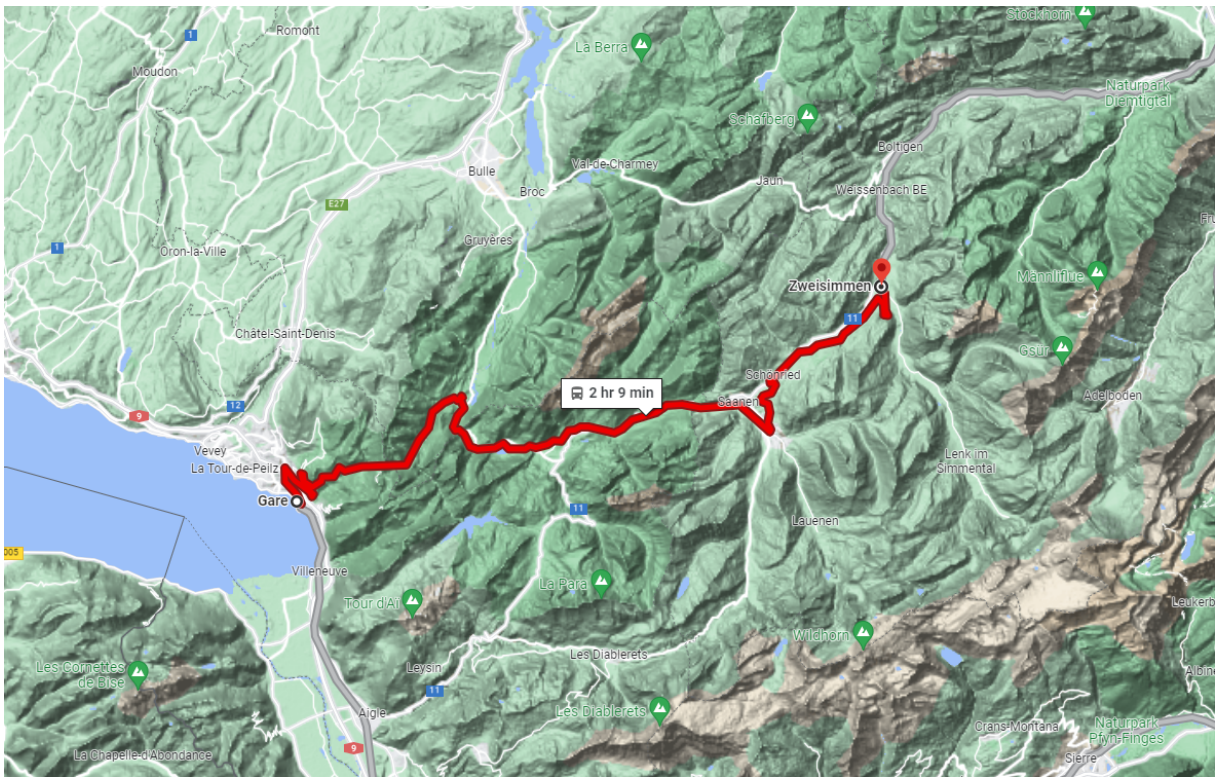


19.1.4 Zermatt-Täsch-Visp

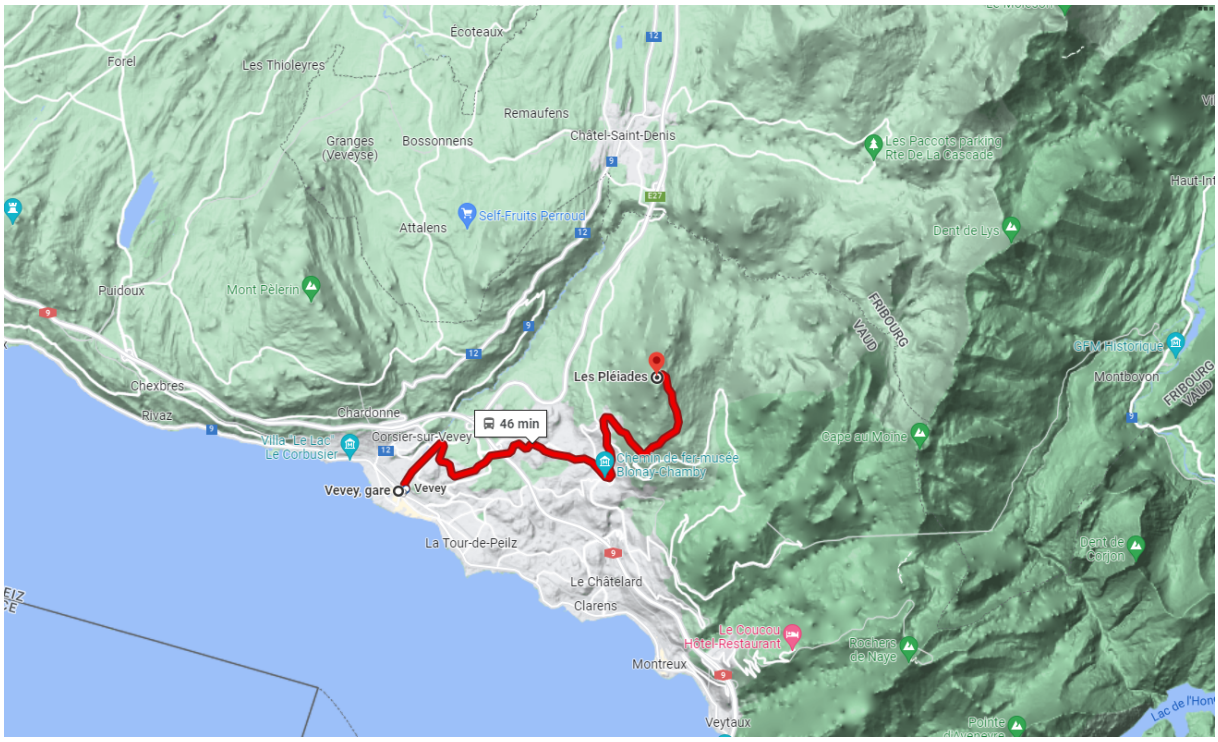


19.2 Compagnie du chemin de fer Montreux Oberland Bernois

19.2.1 Montreux-Gstaad-Zweisimmen



19.2.2 Vevey-Les Pléiades

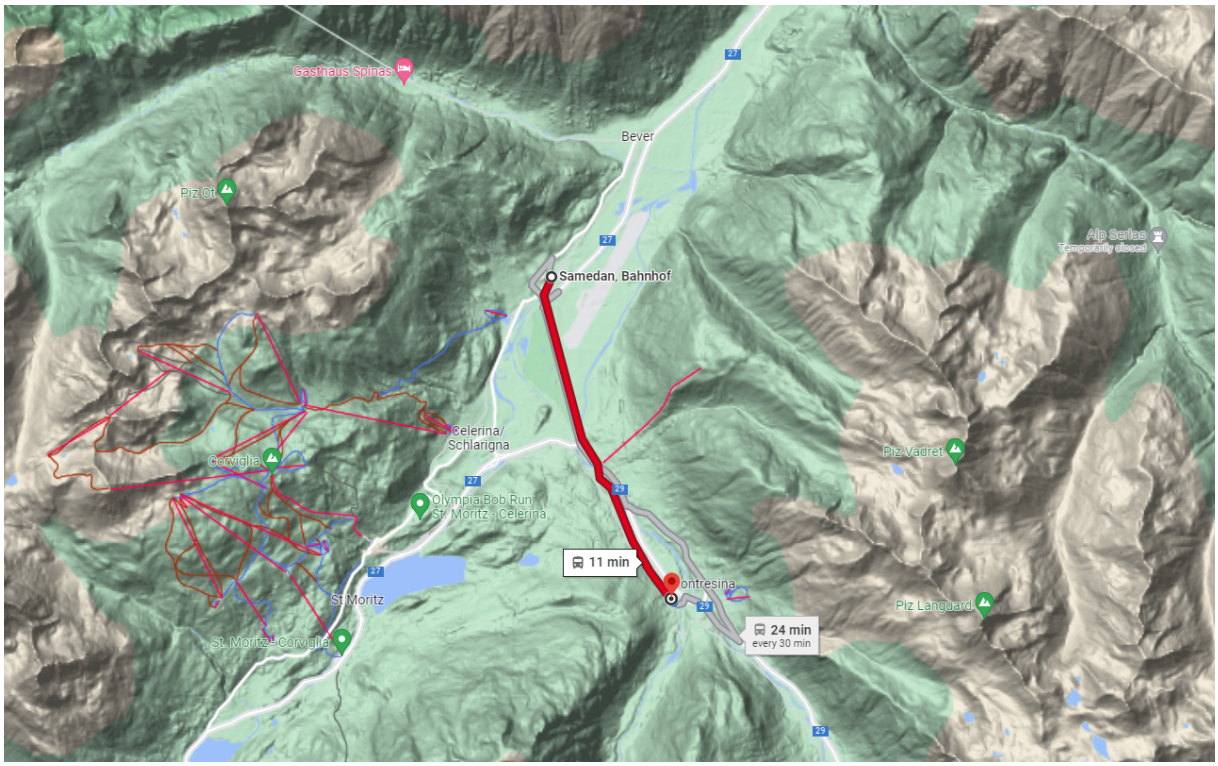


19.3 Rhätische Bahn

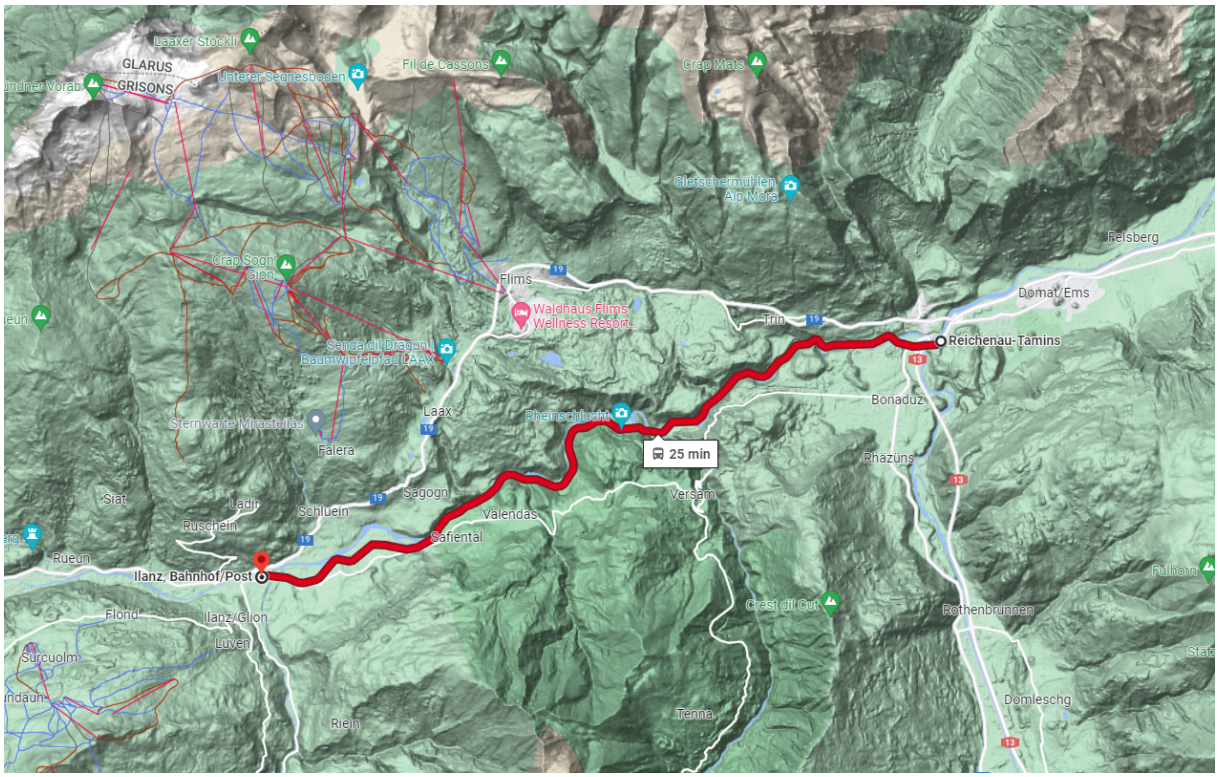
19.3.1 Landquart-Schiers



19.3.2 Samedan-Pontresina



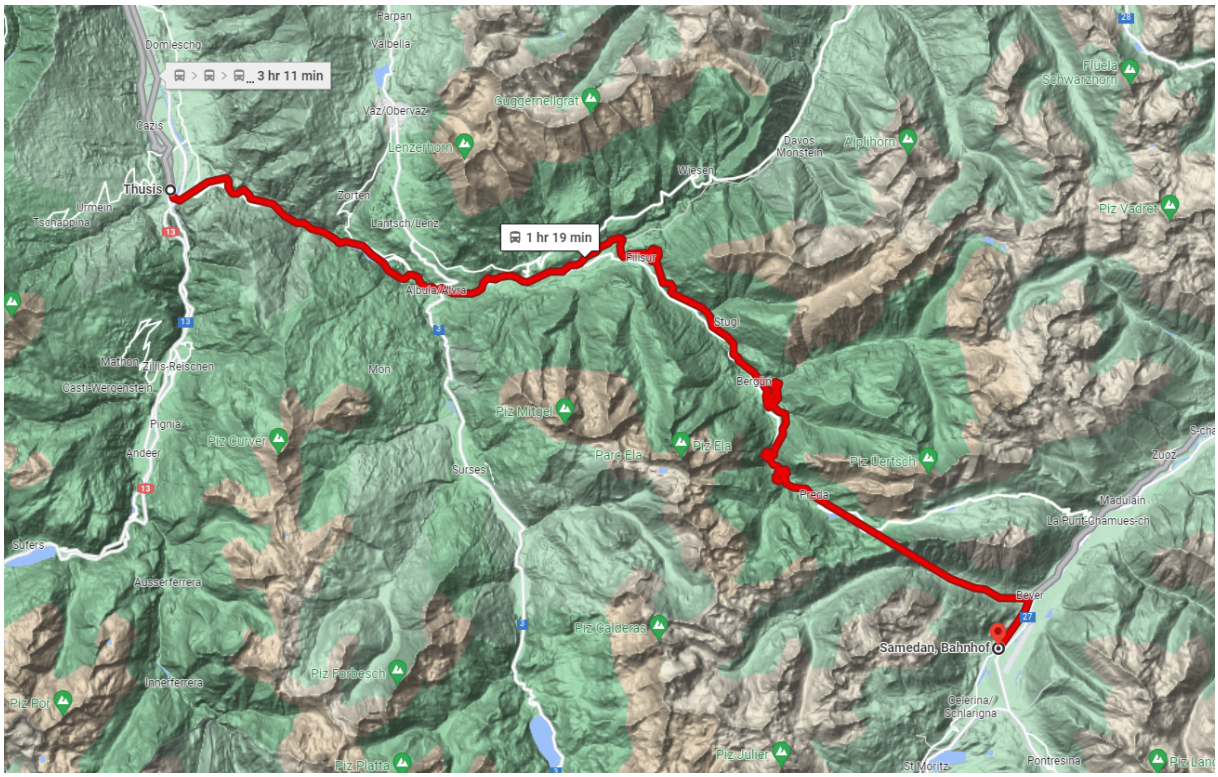
19.3.3 Reichenau-Ilanz



19.3.4 Thusis-Bergün



19.3.5 Thusis-Samedan



19.4 Die Zentralbahn

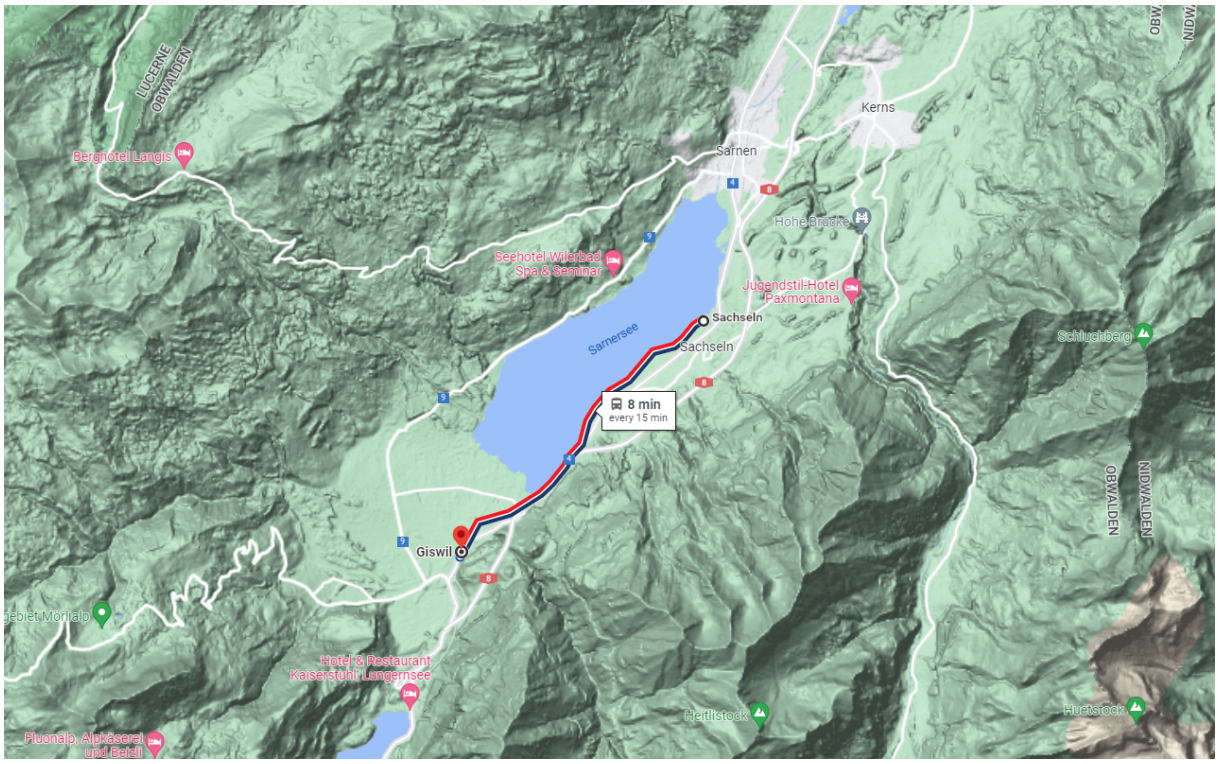
19.4.1 Luzern-Hergiswil



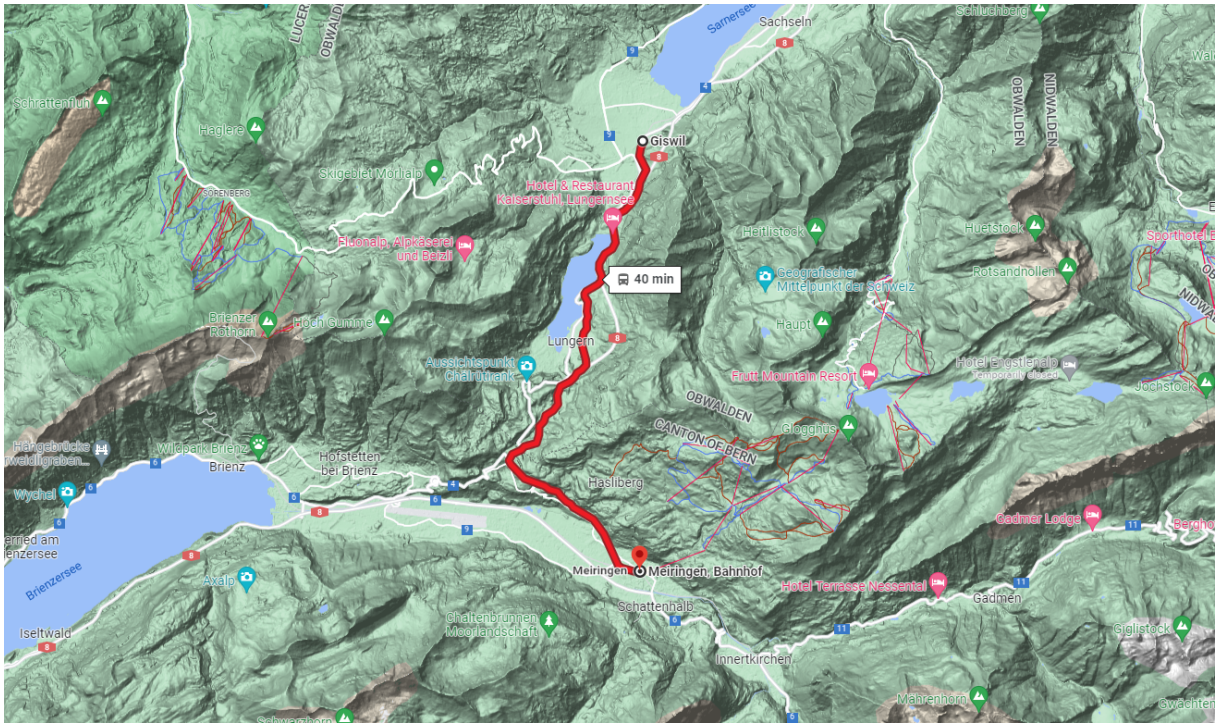
19.4.2 Hergiswil-Sachseln



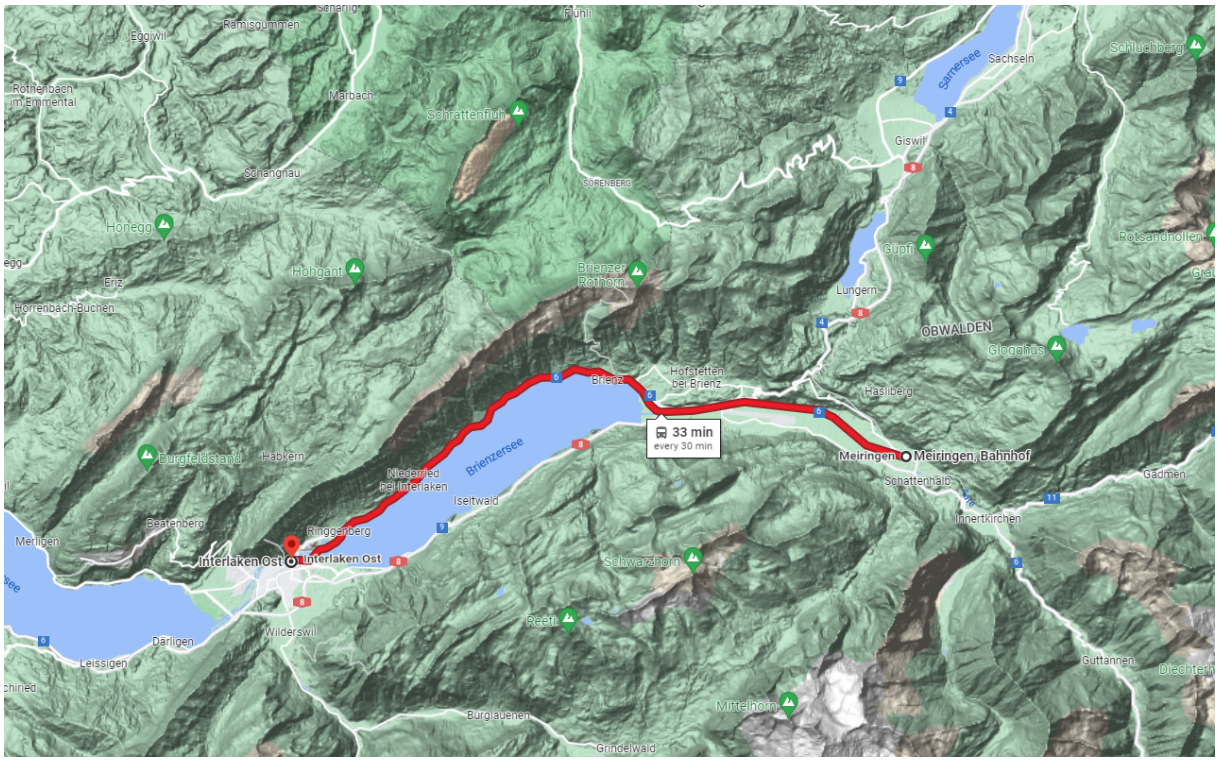
19.4.3 Sachseln-Giswil



19.4.4 Giswil-Meiringen



19.4.5 Meiringen-Interlaken Ost



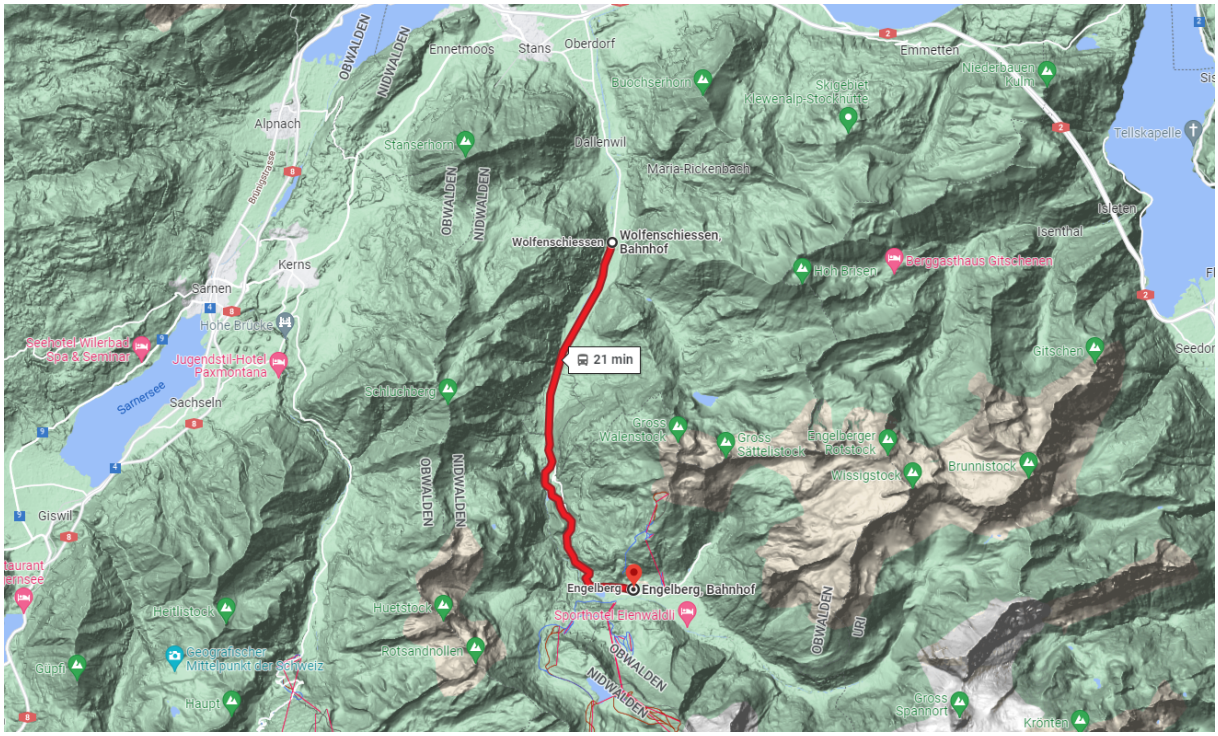
19.4.6 Hergiswil-Stans



19.4.7 Stans-Wolfenschiessen



19.4.8 Wolfenschiessen-Engelberg



20 Annexe E: Paramètres des trafics ferroviaires utilisés

Cette annexe reprend les différentes lignes utilisées pour le calcul des nouvelles courbes λ_1 et leurs principaux paramètres. Le dossier complet correspondant à ce document, avec toutes les données, peut être téléchargé gratuitement sur (ajouter le lien au site de la plateforme).

N	Name	Trains [n/year]	Axles [n/year]	[ton /year]	Q_m [kN]	$Q_{m,\ m=5}$ [kN]	Q_{max} [kN]	$q_{m,\ max}$ [kN/m]
1	MGB_Andermatt-Dieni-Disentis_2019	10 936	201 088	1 369 171	68.1	115.5	160.0	4.33
2	MGB_Andermatt-Dieni-Disentis_2028	11 392	220 816	2 075 001	94.5	108.0	160.0	4.33
3	MGB_Fiesch-Oberw ald-Andermatt_2019	12 526	219 328	1 392 457	63.5	97.7	160.0	4.33
4	MGB_Fiesch-Oberw ald-Andermatt_2028	12 526	241 228	2 283 718	95.2	108.0	160.0	4.33
5	MGB_Oberw ald-Realp_2019	29 716	1 211 168	8 851 083	73.1	97.7	160.0	4.33
6	MGB_Oberw ald-Realp_2028	29 716	1 231 608	9 682 927	78.7	99.6	160.0	4.33
7	MGB_Zermatt-Täsch-Visp_2019	74 044	1 176 736	11 453 836	99.7	107.8	160.0	4.33
8	MGB_Zermatt-Täsch-Visp_2028	64 992	1 040 956	10 562 016	104.1	108.1	160.0	4.33
9	MOB_Montreux-Gstaad-Zw eisimmen_2021	32 120	471 580	4 569 070	96.9	109.4	155.0	3.72
10	MOB_Montreux-Gstaad-Zw eisimmen_2030	35 040	541 660	5 217 310	96.3	109.8	155.0	3.72
11	MOB_Montreux-Gstaad-Zw eisimmen_2031	42 340	716 860	6 837 910	95.4	110.3	155.0	3.72
12	MOB_Vevey-Les Pléiades_2021	43 800	262 800	2 847 000	126.8	126.8	155.0	1.66
13	MOB_Vevey-Les Pléiades_2031	54 020	324 120	3 511 300	126.8	126.8	155.0	1.66
14	RhB_Landquart-Schiers_2020	45 170	1 105 680	7 183 396	65.0	87.2	160.0	5.29
15	RhB_Samedan-Pontresina_2020	16 650	269 160	2 255 354	83.9	94.5	160.0	5.29
16	RhB_Surselvalinie-Reichenau-Ilanz_2020	23 880	610 640	4 035 000	66.1	91.0	160.0	5.29
17	RhB_Thusis-Bergün_2020	19 200	580 000	4 563 000	78.7	108.1	160.0	5.29
18	RhB_Thusis-Samedan_2020	2 000	56 000	568 000	101.4	119.0	160.0	4.35
19	ZB_Giswil-Meiringen_2021	12 410	248 200	2 786 169	112.3	117.7	157.5	4.26
20	ZB_Giswil-Meiringen_2030	15 642	288 456	3 171 184	110.2	118.1	157.5	4.26
21	ZB_Giswil-Meiringen_2045	23 830	476 600	5 265 077	110.5	117.6	157.5	4.26

N	Name	Trains [n/year]	Axles [n/year]	[ton /year]	Q_m [kN]	$Q_{m,\ m=5}$ [kN]	Q_{max} [kN]	$q_{m,\ max}$ [kN/m]
22	ZB_Hergiswil-Sachseln_2021	42 928	492 344	5 100 822	103.8	106.6	157.5	4.26
23	ZB_Hergiswil-Sachseln_2030	44 112	516 216	5 283 658	102.5	106.9	157.5	4.26
24	ZB_Hergiswil-Sachseln_2045	52 300	704 360	7 377 551	104.7	109.6	157.5	4.26
25	ZB_Hergiswil-Stans_2021	48 890	600 080	5 054 769	84.7	103.5	157.5	4.26
26	ZB_Hergiswil-Stans_2030	50 198	593 328	6 151 980	103.9	107.5	157.5	4.26
27	ZB_Hergiswil-Stans_2045	58 070	715 728	7 552 016	105.9	109.6	157.5	4.26
28	ZB_Luzern-Hergiswil_2021	91 818	1 091 624	10 145 719	93.3	104.9	157.5	4.26
29	ZB_Luzern-Hergiswil_2030	97 358	1 158 312	12 037 435	104.1	107.9	157.5	4.26
30	ZB_Luzern-Hergiswil_2045	110 370	1 420 088	14 929 567	105.3	109.6	157.5	4.26
31	ZB_Meiringen-InterlakenOst_2021	27 375	547 500	6 145 961	112.3	117.7	157.5	4.26
32	ZB_Meiringen-InterlakenOst_2030	28 575	571 500	6 330 377	110.8	117.6	157.5	4.26
33	ZB_Meiringen-InterlakenOst_2045	38 795	775 900	8 624 869	111.2	117.7	157.5	4.26
34	ZB_Sachseln-Giswil_2021	40 880	475 960	4 898 643	102.9	105.8	157.5	4.26
35	ZB_Sachseln-Giswil_2030	44 112	516 216	5 283 658	102.5	106.9	157.5	4.26
36	ZB_Sachseln-Giswil_2045	52 300	704 360	7 377 551	104.7	109.6	157.5	4.26
37	ZB_Stans-Wolfenschiessen_2021	44 920	566 576	4 641 330	82.1	102.0	157.5	4.26
38	ZB_Stans-Wolfenschiessen_2030	50 198	593 328	6 151 980	103.9	107.5	157.5	4.26
39	ZB_Stans-Wolfenschiessen_2045	58 070	715 728	7 552 016	105.9	109.6	157.5	4.26
40	ZB_Wolfenschiessen-Engelberg_2021	13 492	315 152	2 309 372	73.7	109.5	157.5	4.26
41	ZB_Wolfenschiessen-Engelberg_2030	18 776	339 008	3 838 131	113.6	118.6	157.5	4.26
42	ZB_Wolfenschiessen-Engelberg_2045	26 648	464 352	5 220 503	113.0	118.7	157.5	4.26
M	Extreme values (max of 42 cases)	110 370	1 420 088	14 929 567	126.8	126.8	160.0	5.29

21 Annexe F: Logiciel de calcul MATLAB

Un document spécifique pour qui concerne l'utilisation du logiciel MATLAB utilisé dans les simulations n'a pas été inclus dans ce rapport en tant qu'objet d'un diffèrent mandat.

La structure de ce document spécifique pourrait être composé comme suit :

- Introduction
- Indication pour l'utilisation
- Trafic classifié
- Exemple d'utilisation
- Interprétation des résultats

L'EPFL recommande le développement d'une documentation spécifique pour l'utilisation de ce logiciel avec trois objectifs principaux : garantir la continuité de cette étude avec les études futures ; permettre aux compagnies de chemin de fer de contrôler/actualiser la méthode de calcul en considérant le trafic roulant sur leur ligne et enfin avoir un moyen pour calculer de manière plus précise les structures existantes dont la méthode simplifiée lambda n'est pas suffisante pour les vérifier.