

Empa  
Überlandstrasse 129  
CH-8600 Dübendorf  
T +41 58 765 11 11  
F +41 58 765 69 93  
[www.empa.ch](http://www.empa.ch)



## sonROAD18

### Modèle de calcul du bruit routier - Version abrégée

Empa-Nr. 5214.010948  
2018-07-09



Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV)

## **Impressum**

Éditeur : Office fédéral de l'environnement (OFEV), Division Bruit et RNI, CH-3003 Berne

L'OFEV est un office du Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC).

Mandataire : Empa, division Acoustique/ Lutte contre le bruit, CH-8600 Dübendorf

Auteur/auteure : Kurt Heutschi, Barbara Locher

Accompagnement OFEV : Michael Gerber

Remarque : ce rapport a été rédigé sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV). Le mandataire est seul responsable de son contenu.

## **Citation**

Heutschi K, Locher B, 2018 : sonROAD18 - Modèle de calcul du bruit routier - Version abrégée.

## **Traduction**

Bénédicte Savary, Traductrice indépendante, Lausanne.

## **Téléchargement au format pdf**

Cette version abrégée se concentre sur les principaux chapitres du rapport final sur sonROAD18. Elle peut être téléchargée en allemand, en français et en italien sur le site internet de l'OFEV, où on trouvera également la version intégrale en allemand.

Le rapport n'est pas disponible sous forme imprimée.

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Résumé</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Mandat et équipe de projet</b>	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>Structure et hypothèses du modèle sonROAD18</b>	<b>9</b>
3.1	Introduction . . . . .	9
3.2	Intégration au formalisme de CNOSSOS . . . . .	9
3.3	Classification des véhicules . . . . .	10
3.4	Hauteur de la source - Effet de sol . . . . .	10
<b>4</b>	<b>Évaluations des données SMA-E</b>	<b>12</b>
<b>5</b>	<b>Mesurages supplémentaires des événements ponctuels et du niveau Leq</b>	<b>12</b>
<b>6</b>	<b>Caractéristique de rayonnement vertical</b>	<b>12</b>
<b>7</b>	<b>Émissions des véhicules électriques et hybrides</b>	<b>12</b>
<b>8</b>	<b>Mesurages explorant la possibilité d'un cumul des effets des pneus et du revêtement</b>	<b>13</b>
<b>9</b>	<b>Estimation des coefficients de modèle</b>	<b>13</b>
<b>10</b>	<b>Formulation du modèle d'émission sonROAD18</b>	<b>14</b>
10.1	Conditions de références . . . . .	14
10.2	Hauteur de la source . . . . .	14
10.3	Données d'entrée du modèle . . . . .	14
10.4	Catégories de véhicules . . . . .	14
10.5	Puissance acoustique rayonnée . . . . .	16
10.6	Relation à la vitesse du niveau A du bruit de propulsion et du bruit de roulement . . . . .	22
10.7	Pneus d'été et d'hiver . . . . .	24
10.8	Situations d'engorgement du trafic . . . . .	24
10.9	Variation des émissions en fonction des véhicules individuels . . . . .	26
10.10	Estimation du niveau Leq à 1 m de distance . . . . .	26
<b>11</b>	<b>Convertisseur SWISS 10</b>	<b>28</b>
11.1	Introduction . . . . .	28
11.2	Classification des routes . . . . .	28
11.3	Base de données . . . . .	28
11.4	Évaluation . . . . .	29
11.5	Fonctions de dispersion et de contraction des écarts temporels . . . . .	30
<b>12</b>	<b>Validation du modèle</b>	<b>32</b>
12.1	Mesurages de validation . . . . .	32
12.2	Calcul du niveau équivalent Leq . . . . .	34
12.3	Résultats de la validation . . . . .	34

<b>13 Incertitude du modèle</b>	<b>37</b>
13.1 Erreurs du modèle . . . . .	37
13.2 Erreurs des données d'entrée . . . . .	37
<b>14 Exemples de calcul</b>	<b>39</b>
<b>15 Caractérisation du revêtement par mesurages SPB</b>	<b>40</b>
15.1 Concept . . . . .	40
15.2 Documentation . . . . .	40
15.3 Analyse . . . . .	41
<b>16 Caractérisation du revêtement par mesurages SEM</b>	<b>42</b>
16.1 Concept . . . . .	42
16.2 Documentation . . . . .	42
16.3 Évaluation . . . . .	42
<b>17 Caractérisation du revêtement par mesurages CPX</b>	<b>44</b>
<b>18 Mesurage des nouveaux types de véhicules</b>	<b>45</b>
<b>19 Interface avec des modèles de propagation</b>	<b>45</b>
<b>20 Comparaison avec StL-86+</b>	<b>46</b>
20.1 Relation à la vitesse des émissions des voitures de tourisme . . . . .	46
20.2 Calcul des scénarios . . . . .	46
<b>21 Estimation du niveau maximum pondéré A du passage</b>	<b>49</b>
21.1 Contexte . . . . .	49
21.2 Analyse des données . . . . .	49
<b>Bibliographie</b>	<b>51</b>
<b>A Liste des annexes au rapport final</b>	<b>53</b>

# 1 Résumé

L'OFEV a mandaté l'Empa pour développer le nouveau modèle d'émissions du bruit routier sonROAD18 afin de prendre en compte les récents changements du parc automobile circulant sur les routes suisses et d'augmenter le niveau de précision de la description des sources. Ce modèle se fonde pour une large part sur le formalisme du modèle européen CNOSSOS, mais utilise les catégories SWISS 10 usuelles en Suisse, complétées des véhicules électriques et hybrides. Une marche à suivre est également indiquée pour les catégories de véhicules particulières afin de déterminer les paramètres du modèle par des techniques de mesurage. Contrairement à CNOSSOS, sonROAD18 est formulé en tiers d'octave et tient compte d'une caractéristique de rayonnement anisotrope dans le plan transversal.

Le modèle décrit la puissance acoustique des émissions d'un véhicule représentatif de la catégorie correspondante en relation avec la vitesse. Il prend également en compte le revêtement, l'inclinaison longitudinale de la chaussée et la température de l'air comme facteurs ayant une influence sur les émissions.

Les paramètres du modèle ont été adaptés à partir d'un large échantillon de mesurages d'événements ponctuels sur des autoroutes, complété par des mesurages dans la zone de vitesse comprise entre 30 et 80 km/h. Pour la caractérisation acoustique des véhicules, on a utilisé le niveau sonore de l'événement. La répartition entre bruit de propulsion et bruit de roulement s'effectue automatiquement dans le processus d'optimisation des paramètres en partant de deux hypothèses a priori : a) la correction du revêtement à appliquer au bruit de roulement ne dépend pas de la vitesse et de la catégorie de véhicule, et b) le bruit de propulsion ne dépend pas de l'emplacement mais seulement de la vitesse et de la déclivité. L'évaluation montre que le bruit des pneus domine à partir d'une vitesse de 20 à 30 km/h pour les véhicules légers, de 40 à 50 km/h pour les véhicules lourds et de 60 km/h pour les motocycles.

La validation a mis en évidence un écart type de 1.5 dB(A) entre la modélisation et le mesurage lorsque les grandeurs d'entrée sont parfaitement connues. Le facteur d'incertitude le plus important s'avère être la correction du revêtement, qui peut présenter des dispersions de 1 dB(A) au sein d'un même type de revêtement examiné par des techniques de mesurage.

La formulation d'une interface avec les modèles de propagation ISO 9613-2 et sonX facilite l'intégration de sonROAD18 dans les modèles servant à pronostiquer les immissions. Le convertisseur SWISS 10 est disponible pour une application lorsqu'une connaissance détaillée des grandeurs d'entrée fait défaut. Il se base sur le type de route et le trafic journalier moyen (TJM), de jour et de nuit, pour fournir une estimation horaire de la quantité de véhicules selon les catégories SWISS 10.

Principales caractéristiques de sonROAD18 :

- Correspond à l'état actuel de la science et de la technique
- Reflète le parc de véhicules circulant actuellement en Suisse ainsi que leurs pneus
- Permet un calcul précis des effets des mesures à la source
- Peut être utilisé avec différents modèles de propagation grâce à sa structure modulaire
- Catégorisation détaillée des véhicules selon le standard SWISS 10, susceptible d'être élargie aux véhicules hybrides et électriques
- Correction spectrale du revêtement indépendamment de la vitesse et de la catégorie de véhicule
- Résolution des fréquences en tiers d'octave pour déterminer les atténuations dues à la propagation
- Autorise les calculs basés sur les vitesses effectives des véhicules (par catégories de véhicules)
- Autorise la simulation des effets d'accélération
- Largement compatible avec le modèle européen CNOSSOS

## 2 Mandat et équipe de projet

Par contrat du 5 octobre 2015, la division Bruit et RNI de l'OFEV a confié à la division Acoustique / Lutte contre le bruit de l'Empa le mandat de développer un nouveau modèle de calcul des émissions de bruit du trafic routier. Ce modèle doit permettre de déterminer les émissions acoustiques des véhicules autorisés à circuler sur les routes suisses pour les évaluer selon l'Ordonnance suisse sur la protection contre le bruit.

Pour élaborer le modèle et résoudre des problèmes spécifiques, il a été possible de disposer d'une vaste base de données externe. Les données à haute résolution temporelle du monitoring du bruit routier SMA-E datant de 2015 ont constitué les données de base. Elles ont été complétées par des fichiers de données provenant de l'OFROU, du TCS, des cantons d'Argovie, des Grisons et de Zurich, de la ville de Zurich, des bureaux d'ingénieurs Basler & Hofmann AG, Grolimund + Partner AG et IFEC ingegneria SA, ainsi que par les données que l'Empa a obtenues par ses propres mesurages.

La direction du projet comprend les personnes suivantes :

### OFEV

Mandant : OFEV, Urs Walker, Division Bruit et RNI

Chef de projet : Michael Gerber, Division Bruit et RNI

### Empa

Chef de projet : Kurt Heutschi

Équipe de projet : Barbara Locher et Katja Henz

Autres mandataires intégrés au projet : Grolimund + Partner AG, CH-3006 Berne pour une évaluation de la banque de données de ses plus récents mesurages par la méthode statistique au passage SPB à des fins de validation du modèle.

L'OFEV a constitué un groupe d'accompagnement constitué des membres suivants :

Urs Walker, OFEV, Div Bruit et RNI, présidence

Dario Bozzolo, IFEC, IFEC ingegneria SA

Andreas Catillaz, OFEV, Div Bruit et RNI

Hans-Peter Gloor, Ct. AG, Departement Bau, Verkehr und Umwelt

Sophie Hoehn, OFEV, Div Bruit et RNI

Dominique Luy, Ct. VD, Direction générale de l'environnement

Yves Pillonel, OFROU, Standards et sécurité de l'infrastructure

Stefanie Rüttener, Ville de Zurich, Umwelt- und Gesundheitsschutz Zürich UGZ

Marco Steiger, Ct. TI, Dipartimento del territorio

Georg Thomann, Ct. GR, Amt für Natur und Umwelt

Les membres du groupe d'accompagnement du projet sonROAD18 étaient chargés entre autres des tâches suivantes :

- Suivi technique visant à garantir la qualité du mandat
- Mise à disposition de leurs expériences avec les modèles de bruit routier en vigueur à ce jour
- Conseils à l'OFEV pour la marche à suivre en cas de données de base manquantes ou insuffisantes
- Conseils à l'OFEV concernant les exigences à remplir par les implémentations prévues de sonROAD18

# 3 Structure et hypothèses du modèle sonROAD18

## 3.1 Introduction

Conformément à l'annexe 2 de l'Ordonnance sur la protection contre le bruit OPB [1], annexe II, l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) recommande aux autorités d'exécution des méthodes de calcul appropriées et adaptées à l'état de la technique. Deux modèles sont actuellement disponibles en Suisse pour le calcul du bruit routier, StL86+ [2] et sonROAD [3]. Le modèle StL86+ est largement répandu et très apprécié en raison de sa simplicité et de son degré de précision relativement élevé pour les situations standard. Le modèle de calcul du bruit routier sonROAD a été développé par l'Empa en 2004. Il a été peu utilisé pour l'application de la législation car il requiert des données de base pas toujours disponibles.

Le modèle StL86+ a bientôt trente ans et la mise en service de sonROAD remonte maintenant à plus d'une dizaine d'années. Les deux modèles ne correspondent plus à l'état actuel de la science et de la technique. Ils peinent à décrire les mesures à la source telles que les réductions de vitesse dans la zone basse, les revêtements peu bruyants et les pneus silencieux.

Le modèle sonROAD18 doit permettre de déterminer avec précision les émissions de bruit des véhicules autorisés en Suisse afin de les évaluer conformément à l'annexe 3 de l'Ordonnance suisse sur la protection contre le bruit OPB. SonROAD18 tient compte des évolutions les plus récentes du parc de véhicules circulant en Suisse et du degré de précision élevé des informations disponibles sur le trafic.

En comparaison avec StL-86+, sonROAD18 présente les avantages suivants :

- Zone de validité élargie pour la vitesse, en particulier en dessous de 50 km/h.
- Valeurs d'émission disponibles pour l'ensemble des catégories de véhicules SWISS 10 basées sur le parc actuel.
- Répartition des émissions selon qu'elles proviennent du roulement ou de la propulsion pour modéliser avec plus de précision les corrections de la pente et du revêtement, en particulier pour les faibles vitesses.
- Possibilités considérablement élargies de calculer des scénarios tels que l'estimation des effets des pneus silencieux, de la mobilité électrique ou des limitations de vitesse supplémentaires pour certaines catégories de véhicules.

## 3.2 Intégration au formalisme de CNOSSOS

La description des émissions par sonROAD18 s'appuie sur le modèle européen CNOSSOS [4]; elle utilise la puissance acoustique des émissions d'un véhicule comme grandeur caractéristique et interface homogène avec le modèle de propagation.

Le modèle s'écarte du formalisme de CNOSSOS sur les points suivants :

- Pour la constitution des catégories de véhicules, sonROAD se base sur les catégories SWISS 10. Une correspondance avec les données obtenues par des postes de comptage automatique du trafic est ainsi rendue possible.
- Dans la représentation spectrale, sonROAD adopte une résolution par bandes de tiers d'octave. Celle-ci permet une interface avec les modèles de propagation basés sur une formulation par bandes de tiers d'octave.
- Pour la caractéristique de rayonnement, sonROAD18 postule une directivité anisotrope dans le plan transversal. Cela permet de prendre en compte un phénomène systématique qui conduit à modifier les immissions de manière significative en cas de constructions antibruit proche de la route ou de récepteur en position élevée.

- Pour la formulation de l'effet du revêtement, sonROAD18 n'utilise la correction du revêtement que pour le bruit de roulement et l'applique à l'identique indépendamment de la vitesse pour toutes les catégories de véhicules. Cela permet une simplification sans impact notable compte tenu du degré de précision en principe requis pour les pronostics.
- La détermination de la température est fixée à 10°C dans sonROAD18. Cette température correspond approximativement à la valeur moyenne annuelle<sup>1</sup>, sur le Plateau suisse, si bien qu'il n'est pas nécessaire d'effectuer une correction de la température pour les calculs portant sur des moyennes annuelles.
- Pour la correction de l'accélération à proximité des carrefours régis par des feux de signalisation ou des giratoires, la correction appliquée dans CNOSSOS est supprimée dans sonROAD18, ou elle est remplacée pour les applications spéciales par une simulation du processus d'accélération la mettant en relation avec une déclivité équivalente.

### 3.3 Classification des véhicules

Les véhicules à prendre en compte pour le calcul du bruit sur les routes suisses sont catégorisés autant que possible selon le schéma de classification SWISS 10 [5], auquel viennent s'ajouter les systèmes de propulsion alternatifs.

Cat. SWISS 10	Description	Cl. CNOSSOS	Description
1	Bus	3	Véhicules lourds
1b	Bus à propulsion hybride ou électrique		
2	Motocycles	4b	Motocycles
3	Voitures de tourisme	1	Véhicules légers
3b	Voitures de tourisme à propulsion hybride		
3c	Voitures de tourisme à propulsion électrique		
4	Voitures de tourisme avec remorque	1	Véhicules légers
5	Voiture de livraison jusqu'à 3.5 t	1	Véhicules légers
6	Voiture de livraison jusqu'à 3.5 t avec remorque	1	Véhicules légers
7	Voiture de livraison jusqu'à 3.5 t avec galerie	1	Véhicules légers
8	Camion	3	Véhicules lourds
9	Train routier	3	Véhicules lourds
10	Véhicule articulé	3	Véhicules lourds
11	Camion avec propulsion électrique		

TABLE 3.1 – Catégories SWISS 10 (élargies) et classes CNOSSOS correspondantes.

Les émissions des trams en tant que véhicules circulant sur rails ne sont pas spécifiées dans sonROAD18, mais dans sonTRAM.

### 3.4 Hauteur de la source - Effet de sol

CNOSSOS modélise tous les véhicules quelle que soit leur catégorie comme des sources ponctuelles concentrées à 0.05 m au-dessus de la chaussée. Lors du calcul du modèle d'interférence entre le son direct et le son réfléchi par le sol, il en résulte dans la géométrie de référence, à une distance de 7.5 m du milieu de la chaussée et une hauteur du point mesuré de 1.2 m, un effet de sol qui amplifie jusqu'aux fréquences élevées. Lorsqu'on augmente la hauteur de la cible, le premier minimum d'interférence se décale vers le bas, de telle sorte que dans la zone proche de la source, la géométrie influence assez fortement les immissions en raison de l'effet de sol (Figure 3.1).

Le tableau 3.2 montre l'élévation du niveau sonore due à l'effet de sol pour toute la durée d'un passage, selon différentes géométries. On a postulé pour cela un spectre source pour une VT à 80 km/h selon CNOSSOS dans les conditions de référence.

1. Moyenne annuelle pour 2018 pour la partie septentrionale de la Suisse (versant nord des Alpes) au-dessous de 100 m : 9.7 °C. Source : MétéoSuisse, Begert M, Frei C. Area-mean temperatures of Switzerland. DOI : 10.18751/Climate/Timeseries/CHTM/1.0, 10.02.2018.



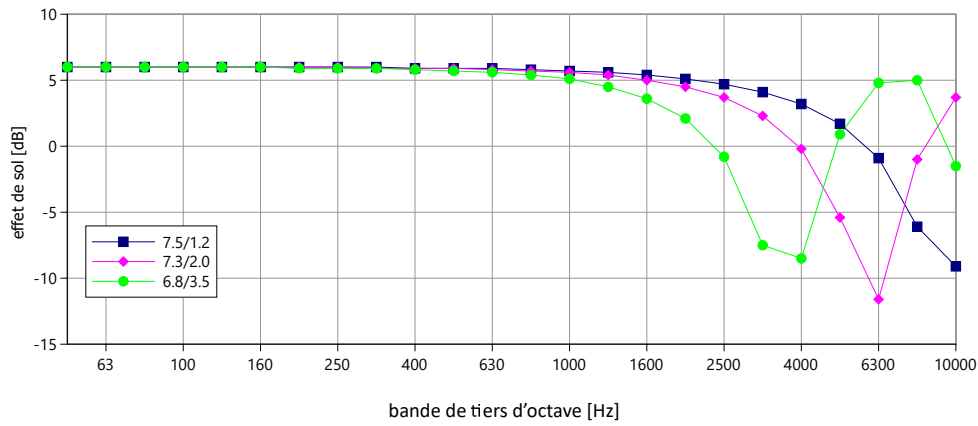


FIGURE 3.1 – Spectre résultant de l'effet de sol pour une source ponctuelle située à 0.05 m sur un sol dur et un point récepteur situé à différentes hauteurs, la distance étant maintenue constante.

$h_q$	$h_m$	$d_h$	$d$	$D_{gr}$
0.05	1.2 m	7.5 m	7.6 m	5.4 dB(A)
0.05	2.0 m	7.3 m	7.6 m	5.0 dB(A)
0.05	3.5 m	6.8 m	7.6 m	3.9 dB(A)
0.05	5.0 m	5.7 m	7.6 m	2.6 dB(A)
0.45	1.2 m	7.5 m	7.6 m	1.3 dB(A)

TABLE 3.2 – Effet de sol  $D_{gr}$  en dB(A) ) pour toute la durée du passage d'une source ponctuelle omnidirectionnelle à une hauteur  $h_q$  de 0.05 m ou 0.45 m (sonRoad [3]) différentes hauteurs de microphone  $h_m$  et différents espacements sur l'axe horizontal  $d_h$ , compte tenu de la distance effective  $d = 7.6$  m.

Pour éliminer la forte dépendance à la géométrie visible au tableau 3.2 on a choisi de prendre en compte les effets des phénomènes de réflexion à la surface de la chaussée de manière globale et indépendamment des fréquences, et donc de suivre la définition de la source de CNOSSOS, à savoir l'hypothèse d'une source ponctuelle à 0.05 m et de conditions de propagation en champ libre. Cela revient à postuler un effet de sol de +3 dB dont il convient de tenir compte lors de la formulation de l'interface avec un modèle de propagation.

## **4 Évaluations des données SMA-E**

Documentation des données de base collectées sur les sites SMA-E de Camignolo, Moleno, Reiden et Rothenbrunnen et utilisées pour le développement du modèle ; description de la stratégie d'évaluation visant à déterminer l'énergie de l'événement sonore produit par chaque véhicule et de la puissance acoustique rayonnée qui en découle. Pour un exposé détaillé, se reporter à la version intégrale du rapport final sur sonROAD18.

## **5 Mesurages supplémentaires des événements ponctuels et du niveau Leq**

Description des mesurages complémentaires d'émissions de bruit routier effectués par l'Empa pour les basses et moyennes vitesses à des fins d'adaptation des paramètres du modèle et de validation. Pour un exposé détaillé, se reporter à la version intégrale du rapport final sur sonROAD18.

## **6 Caractéristique de rayonnement vertical**

Documentation des mesurages effectués par l'Empa pour étudier la caractéristique de rayonnement vertical des véhicules et en déduire un lien fonctionnel avec la description de la diminution du niveau sonore selon la fréquence lorsque l'angle d'élévation augmente. Pour un exposé détaillé, se reporter à la version intégrale du rapport final sur sonROAD18.

## **7 Émissions des véhicules électriques et hybrides**

Étude de la littérature sur les émissions acoustiques des véhicules électriques et synthèse des résultats d'une enquête auprès des fabricants et importateurs de voitures au sujet des particularités éventuelles des pneus des voitures de tourisme électriques. Pour un exposé détaillé, se reporter à la version intégrale du rapport final sur sonROAD18.

## **8 Mesurages explorant la possibilité d'un cumul des effets des pneus et du revêtement**

Description et évaluation des mesurages effectués par l'Empa sur quatre revêtements différents avec des véhicules identiques mais équipés de différents types de pneus pour étudier la possibilité éventuelle d'un cumul de l'effet atténuateur du bruit sur des revêtements peu bruyants et avec des pneus silencieux. Pour un exposé détaillé, se reporter à la version intégrale du rapport final sur sonROAD18.

## **9 Estimation des coefficients de modèle**

Présentation des hypothèses et de la stratégie d'adaptation adoptées pour déterminer les coefficients de modèle et la liste des campagnes de mesurages utilisées à cette fin. Pour un exposé détaillé, se reporter à la version intégrale du rapport final sur sonROAD18.

# 10 Formulation du modèle d'émission sonROAD18

Ce chapitre reprend les hypothèses émises au chapitre 3 et présente une description complète du modèle d'émission sonROAD18 et du réglage des paramètres.

## 10.1 Conditions de références

sonROAD18 se fonde sur les conditions de référence suivantes :

- Chaussée sèche et horizontale avec revêtement ACMR8 ou SDA8-12
- Température de l'air de 10°
- Vitesse de conduite constante de 70 km/h
- Pneus considérés comme typiques au moment du développement du modèle.

## 10.2 Hauteur de la source

Pour toutes les catégories et composantes du bruit, la hauteur de la source est fixée à 0.05 m au-dessus de la chaussée.

## 10.3 Données d'entrée du modèle

Une modélisation du bruit routier exige de connaître, pour chaque voie ou direction de circulation,

- Les moyennes de trafic horaire  $N[c]$  pour toutes les catégories de véhicule SWISS 10  $c$
- Les vitesses  $v[c]$  pour toutes les catégories de véhicules SWISS 10, la plage de validité du modèle étant limitée à  $20 \text{ km/h} \leq v \leq 130 \text{ km/h}$
- Le type de revêtement ou son influence spectrale  $\Delta L_{W,R,\text{road}}[i]$
- L'inclinaison longitudinale de la route (en fonction du signe)
- La température de l'air.

Lorsqu'il n'est pas possible d'obtenir des données détaillées sur les volumes de trafic propres à chaque classe de véhicule, les données d'entrées peuvent être estimées à l'aide du convertisseur SWISS-10 (chapitre 11).

Le modèle permet également de prendre en compte une correction du bruit du roulement spécifique selon les types de revêtement et de pneus. Les données manquent actuellement à ce sujet et seront ajoutées plus tard.

## 10.4 Catégories de véhicules

Le tableau 10.1 dresse la liste des catégories  $c$  appliquées pour caractériser les véhicules circulant sur une route donnée. Il se fonde sur SWISS 10 selon [5] et a été complété par quatre catégories correspondant à des systèmes de propulsion particuliers.

Des coefficients de modèle  $A$  et  $B$  ont été déterminés pour toutes les catégories de véhicules répandues et significatives du point de vue de l'acoustique au moment du développement du modèle. Il faut retenir que la catégorie 1 (bus) représente avant tous les cars touristiques. Pour fixer les coefficients de modèle des véhicules des entreprises de transports urbains et des catégories 1b, 3b, 3c et 11, ainsi que ceux d'autres catégories exclusives, on se reportera au chapitre 18.

cat. SWISS 10 <i>c</i>	Description
1	Bus
1b	Bus à propulsion hybride ou électrique
2	Motocycles
3	Voiture de tourisme
3b	Voiture de tourisme a propulsion hybride
3c	Voiture de tourisme a propulsion électrique
4	Voiture de tourisme avec remorque
5	Voiture de livraison jusqu'à 3.5t
6	Voiture de livraison jusqu'à 3.5t avec remorque
7	Voiture de livraison jusqu'à 3.5t avec galerie
8	Camion
9	Train routier
10	Véhicule articulé
11	Camion avec propulsion électrique

TABLE 10.1 – Catégories SWISS 10 (élargies).

## 10.5 Puissance acoustique rayonnée

### 10.5.1 Bruit total

La puissance acoustique  $L_W[c, i]$  rayonnée par un véhicule de la catégorie  $c$  en tiers d'octave avec un index  $i$  - en supposant que la réflexion du sol proche de la source soit prise en compte dans le calcul de la propagation par +3 dB - se compose de la somme énergétique des composantes du bruit provenant de la propulsion ( $L_{W,P[c,i]}$ ) et du roulement ( $L_{W,R[c,i]}$ ) ainsi que d'une correction pour la caractéristique de rayonnement vertical  $\Delta L_{W,\theta}[c, i]$  :

$$L_W[c, i] = 10 \lg (10^{0.1L_{W,P[c,i]}} + 10^{0.1L_{W,R[c,i]}}) + \Delta L_{W,\theta}[c, i] \quad (10.1)$$

Le terme de la caractéristique de rayonnement  $\Delta L_{W,\theta}[c, i]$  correspond à

$$\Delta L_{W,\theta}[c, f] = D_1[c] \sin(\theta)^3 \cdot (\lg(f) + D_2[c])^3 \quad (10.2)$$

Où  $f$  désigne la fréquence centrale de la bande de tiers d'octave  $i$  et les paramètres  $D_1[c]$  et  $D_2[c]$  sont donnés en fonction des catégories de véhicules selon le tableau 10.2. On notera que  $\theta$  désigne l'angle d'élévation à une distance perpendiculaire et doit être supposé constant lors de l'intégration sur un passage.

Cat. SWISS 10 $c$	$D_1[c]$	$D_2[c]$
1	-0.04	1.6
1b	-0.04	1.6
2	0.0	0.0
3	-0.11	0.0
3b	-0.11	0.0
3c	-0.11	0.0
4	-0.11	0.0
5	-0.11	0.0
6	-0.11	0.0
7	-0.11	0.0
8	-0.04	1.6
9	-0.04	1.6
10	-0.04	1.6
11	-0.04	1.6

TABLE 10.2 – Paramètres  $D_1$  et  $D_2$  pour le calcul de la caractéristique de rayonnement vertical.

## 10.5.2 Bruit de propulsion

Le niveau de puissance acoustique du bruit de propulsion est donné par :

$$L_{W,P}[c, i] = A_P[c, i] + B_P[c, i] \frac{v[c] - v_{\text{ref}}}{v_{\text{ref}}} + \Delta L_{W,P,\text{grad}}[c] \quad (10.3)$$

Où  $v[c]$  désigne la vitesse avec  $v_{\text{ref}} = 70$  km/h et où les paramètres  $A_P$  (part constante) et  $B_P$  (fonction de la vitesse) sont fixés selon les tableaux 10.3 et 10.4.

freq	cat1	cat2	cat3	cat4	cat5	cat6	cat7	cat8	cat9	cat10
50	99.5	99.1	91.0	91.0	95.5	92.0	92.0	100.6	101.2	99.7
63	98.0	100.6	87.5	87.5	96.5	92.0	92.0	102.2	106.6	106.2
80	96.0	102.2	86.5	86.5	89.5	92.0	92.0	99.7	102.7	101.2
100	94.5	102.2	84.5	84.5	86.0	91.7	91.7	97.6	97.5	96.2
125	99.0	103.8	83.0	83.0	85.0	91.7	91.7	97.0	99.2	98.0
160	90.0	100.6	83.5	83.5	86.0	91.7	91.7	95.9	95.7	95.7
200	86.5	95.9	82.5	82.5	85.0	91.0	91.0	93.9	93.7	91.4
250	95.5	89.7	83.0	83.0	85.0	91.0	91.0	96.0	96.0	93.8
315	95.0	85.0	82.5	82.5	85.0	91.0	91.0	97.6	97.6	96.5
400	96.5	86.6	81.0	81.0	85.0	91.0	91.0	96.0	96.0	97.4
500	92.0	86.6	81.0	81.0	83.5	91.0	91.0	98.0	98.0	99.1
630	91.0	88.1	83.5	83.5	82.5	91.0	91.0	97.4	97.4	96.2
800	92.0	88.1	82.5	82.5	89.0	93.8	93.8	95.6	95.6	95.9
1000	93.5	85.0	79.0	79.0	85.0	93.8	93.8	89.1	89.1	92.0
1250	87.5	85.0	74.0	74.0	80.5	93.8	93.8	86.0	86.0	90.0
1600	85.0	85.0	72.0	72.0	76.0	90.4	90.4	89.5	89.5	88.3
2000	82.0	83.4	73.5	73.5	79.5	90.4	90.4	90.1	90.1	86.3
2500	83.0	83.4	72.5	72.5	80.5	90.4	90.4	88.3	88.3	85.7
3150	81.5	83.4	73.0	73.0	80.0	84.0	84.0	86.0	86.0	85.2
4000	82.0	83.4	70.0	70.0	78.5	84.0	84.0	84.4	84.4	82.6
5000	79.5	83.4	66.5	66.5	77.0	84.0	84.0	83.4	83.4	77.9
6300	77.0	81.9	64.5	64.5	73.5	77.9	77.9	81.5	81.5	67.1
8000	76.5	80.3	60.5	60.5	70.0	77.9	77.9	79.4	79.4	60.0
10000	60.0	80.3	60.0	60.0	68.0	77.9	77.9	77.8	77.8	60.0

TABLE 10.3 – Paramètres  $A_P$  spectraux de la composante du bruit provenant de la propulsion pour les catégories SWISS 10 1 à 10.

$\Delta L_{W,P,\text{grad}}[c]$  est une correction de la pente, indépendante de la fréquence, pour l'inclinaison longitudinale de la route  $s$  avec

$$c = 3, 4, 5, 6, 7 \quad \rightarrow \quad \Delta L_{W,P,\text{grad}}[c] = \begin{cases} \frac{\min(12\%; -s) - 6\%}{1\%} & : s < -6\% \\ 0 & : -6\% \leq s \leq 2\% \\ \frac{\min(12\%; s) - 2\%}{1.5\%} \cdot \frac{v}{100} & : s > 2\% \end{cases} \quad (10.4)$$

$$c = 1, 8, 9, 10 \quad \rightarrow \quad \Delta L_{W,P,\text{grad}}[c] = \begin{cases} \frac{\min(12\%; -s) - 4\%}{0.5\%} \cdot \frac{v-10}{100} & : s < -4\% \\ 0 & : -4\% \leq s \leq 0\% \\ \frac{\min(12\%; s)}{0.8\%} \cdot \frac{v}{100} & : s > 0\% \end{cases} \quad (10.5)$$

$$c = 2 \quad \rightarrow \quad \Delta L_{W,P,\text{grad}}[c] = 0 \quad (10.6)$$

Comme l'impact de la déclivité est différent selon que le véhicule monte ( $s$  positif) ou descend ( $s$  négatif), on réalisera un pronostic typique en répartissant une moitié du trafic dans chacune des deux directions et en calculant l'une et l'autre séparément.

freq	cat1	cat2	cat3	cat4	cat5	cat6	cat7	cat8	cat9	cat10
50	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0
63	0.0	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0
80	0.0	3.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0
100	3.0	3.5	7.2	7.2	4.7	4.7	4.7	3.0	3.0	3.0
125	3.0	3.5	7.2	7.2	4.7	4.7	4.7	3.0	3.0	3.0
160	3.0	7.8	7.2	7.2	4.7	4.7	4.7	3.0	3.0	3.0
200	4.6	9.7	7.7	7.7	6.4	6.4	6.4	4.6	4.6	4.6
250	4.6	9.0	7.7	7.7	6.4	6.4	6.4	4.6	4.6	4.6
315	4.6	9.0	7.7	7.7	6.4	6.4	6.4	4.6	4.6	4.6
400	5.0	9.0	8.0	8.0	6.5	6.5	6.5	5.0	5.0	5.0
500	5.0	7.8	8.0	8.0	6.5	6.5	6.5	5.0	5.0	5.0
630	5.0	8.3	8.0	8.0	6.5	6.5	6.5	5.0	5.0	5.0
800	5.0	9.7	8.0	8.0	6.5	6.5	6.5	5.0	5.0	5.0
1000	5.0	9.7	8.0	8.0	6.5	6.5	6.5	5.0	5.0	5.0
1250	5.0	9.4	8.0	8.0	6.5	6.5	6.5	5.0	5.0	5.0
1600	5.0	7.8	8.0	8.0	6.5	6.5	6.5	5.0	5.0	5.0
2000	5.0	8.9	8.0	8.0	6.5	6.5	6.5	5.0	5.0	5.0
2500	5.0	9.7	8.0	8.0	6.5	6.5	6.5	5.0	5.0	5.0
3150	5.0	9.7	8.0	8.0	6.5	6.5	6.5	5.0	5.0	5.0
4000	5.0	9.2	8.0	8.0	6.5	6.5	6.5	5.0	5.0	5.0
5000	5.0	8.3	8.0	8.0	6.5	6.5	6.5	5.0	5.0	5.0
6300	5.0	9.7	8.0	8.0	6.5	6.5	6.5	5.0	5.0	5.0
8000	5.0	9.7	8.0	8.0	6.5	6.5	6.5	5.0	5.0	5.0
10000	5.0	9.7	8.0	8.0	6.5	6.5	6.5	5.0	5.0	5.0

TABLE 10.4 – Paramètres  $B_P$  spectraux de la composante du bruit provenant de la propulsion pour les catégories SWISS 10 1 à 10.



### 10.5.3 Bruit de roulement

Le niveau de puissance acoustique du bruit de roulement est donné tel que :

$$L_{W,R}[c, i] = A_R[c, i] + B_R[c, i] \lg \left( \frac{v[c]}{v_{\text{ref}}} \right) + \Delta L_{W,R,\text{road}}[i] + \Delta L_{W,R,\text{temp}}[c] + \Delta L_{W,R,\text{tire}}[c, \text{Belag}] \quad (10.7)$$

Où  $v[c]$  représente la vitesse avec  $v_{\text{ref}} = 70 \text{ km/h}$  et les paramètres  $A_R$  (part constante) et  $B_R$  (fonction de la vitesse) sont fixés selon le tableau 10.5 et 10.6.

freq	cat1	cat2	cat3	cat4	cat5	cat6	cat7	cat8	cat9	cat10
50	83.9	84.0	85.5	90.0	87.0	92.6	93.8	87.8	92.6	92.6
63	97.2	93.4	90.5	95.8	89.0	96.4	101.9	90.0	91.8	91.8
80	96.9	93.4	90.5	93.5	91.5	94.9	99.6	90.0	90.7	90.7
100	94.3	90.2	88.4	91.1	88.4	91.3	93.8	89.9	91.8	91.8
125	82.3	88.7	86.5	90.4	90.0	89.4	94.8	90.4	92.5	92.5
160	93.8	85.5	84.9	88.5	89.4	85.7	93.4	91.6	92.2	92.2
200	98.8	93.2	85.3	88.6	88.8	86.0	93.6	92.9	94.2	94.2
250	91.9	93.4	86.0	89.9	89.0	86.1	95.1	91.8	90.9	90.9
315	86.4	91.8	86.0	89.7	88.0	89.5	101.5	97.6	91.3	91.3
400	90.2	90.4	86.6	90.2	87.6	92.2	100.8	99.1	97.2	97.2
500	96.1	88.9	87.2	90.9	89.7	94.0	101.7	98.3	97.8	97.8
630	97.1	87.3	88.2	94.2	91.7	96.2	104.0	101.9	101.4	101.4
800	98.6	87.6	92.5	98.0	94.5	98.9	104.9	103.3	104.4	104.4
1000	97.1	89.2	95.0	97.9	97.0	97.7	102.3	102.1	102.3	102.3
1250	96.1	90.8	94.0	96.9	95.0	97.0	100.0	100.6	100.3	100.3
1600	94.5	89.0	92.3	96.2	93.3	96.6	98.2	98.4	98.3	98.3
2000	92.6	88.9	90.7	93.9	90.7	93.6	95.4	95.7	95.7	95.7
2500	89.8	87.0	87.4	90.7	87.4	89.3	91.4	92.0	92.9	92.9
3150	86.6	85.2	84.1	87.5	84.1	87.8	89.5	89.4	89.9	89.9
4000	83.6	83.0	81.0	84.3	81.0	84.0	86.3	87.1	87.6	87.6
5000	81.5	80.9	77.5	81.1	77.5	79.7	82.3	82.7	84.9	84.9
6300	80.7	79.1	74.7	79.6	76.7	80.5	82.2	80.9	83.7	83.7
8000	79.7	78.8	72.4	78.6	75.4	79.2	81.1	79.1	82.5	82.5
10000	78.4	75.4	69.6	76.3	73.1	76.7	79.4	77.1	80.6	80.6

TABLE 10.5 – Paramètres  $A_R$  spectraux de la composante du bruit provenant du roulement pour les catégories SWISS 10 1 à 10.

$\Delta L_{W,R,\text{road}}[i]$  désigne l'influence spectrale du revêtement<sup>1</sup>. Pour caractériser les propriétés du revêtement par des techniques de mesurage, on dispose principalement des trois méthodes SPB (chapitre 15), SEM (chapitre 16) et CPX (chapitre 17). Lorsque le spectre de la correction du revêtement n'est pas connu, on peut s'aider d'une Valeur unique. Pour le revêtement de référence ACMR8 ou SDA8-12, la relation est  $\Delta L_{W,R,\text{road}}[i] = 0$ .

$\Delta L_{W,R,\text{temp}}[c]$  décrit la dépendance du bruit de roulement à la température pour une température de l'air  $\tau$  en degrés Celsius avec le coefficient  $K[c]$  selon le tableau 10.7, selon

$$\Delta L_{W,R,\text{temp}}[c] = K[c] \cdot (10 - \tau) \quad (10.8)$$

$\Delta L_{W,R,\text{tire}}[c, \text{Belag}]$  est une correction visant à prendre en compte un type de pneus s'écartant de la moyenne et à adapter le modèle à l'évolution de la moyenne des pneus du parc automobile suisse. Elle permet en outre de calculer différents scénarios en fonction des types de pneus utilisés au sein de celui-ci. Cette correction est tributaire de la catégorie de véhicule et du revêtement, l'influence des pneus ne pouvant pas être spécifiée indépendamment du revêtement (voir chapitre 8). Il faut donc disposer d'une base fiable pour la classification

1. On trouvera les valeurs utilisées pour le développement et la validation du modèle au chapitre 9.

freq	cat1	cat2	cat3	cat4	cat5	cat6	cat7	cat8	cat9	cat10
50	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0
63	38.1	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	40.0	40.0	40.0
80	40.0	25.0	27.3	27.3	27.0	27.0	27.0	40.0	40.0	40.0
100	40.0	25.0	29.5	29.5	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0
125	25.0	25.5	36.5	36.5	30.0	30.0	30.0	25.0	25.0	25.0
160	32.0	25.0	36.4	36.4	28.0	28.0	28.0	25.0	25.0	25.0
200	25.0	25.0	32.0	32.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0
250	25.0	37.2	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	34.0	25.0	25.0
315	40.0	37.7	25.0	25.0	28.9	28.9	28.9	40.0	40.0	40.0
400	40.0	38.1	25.3	25.3	25.1	25.1	25.1	40.0	40.0	40.0
500	40.0	35.3	26.6	26.6	25.0	25.0	25.0	40.0	40.0	40.0
630	40.0	35.3	32.0	32.0	25.0	25.0	25.0	40.0	40.0	40.0
800	40.0	37.7	31.0	31.0	28.9	28.9	28.9	40.0	40.0	40.0
1000	40.0	38.6	33.1	33.1	30.5	30.5	30.5	28.8	40.0	40.0
1250	39.6	35.3	38.7	38.7	34.0	34.0	34.0	27.5	40.0	40.0
1600	40.0	36.7	39.5	39.5	35.8	35.8	35.8	27.7	40.0	40.0
2000	38.9	33.0	39.8	39.8	39.3	39.3	39.3	32.0	40.0	40.0
2500	37.3	30.6	39.8	39.8	39.8	39.8	39.8	40.0	40.0	40.0
3150	39.3	26.9	39.8	39.8	39.8	39.8	39.8	36.0	40.0	40.0
4000	40.0	25.0	38.0	38.0	39.8	39.8	39.8	31.2	40.0	40.0
5000	39.4	25.0	36.8	36.8	39.8	39.8	39.8	40.0	40.0	40.0
6300	40.0	25.5	39.8	39.8	39.8	39.8	39.8	40.0	40.0	40.0
8000	40.0	25.0	39.8	39.8	39.8	39.8	39.8	40.0	40.0	40.0
10000	40.0	29.7	39.8	39.8	39.8	39.8	39.8	40.0	40.0	40.0

TABLE 10.6 – Paramètres  $B_R$  spectraux de la composante du bruit provenant du roulement pour les catégories SWISS 10 1 à 10.

Cat. SWISS 10 c	$K[c]$
1	0.04
1b	0.04
2	0
3	0.08
3b	0.08
3c	0.08
4	0.08
5	0.08
6	0.08
7	0.08
8	0.04
9	0.04
10	0.04
11	0.04

TABLE 10.7 – Paramètres  $K$  pour la correction de la température du bruit de roulement.

des pneus en fonction du bruit, ou développer une nouvelle *modélisation du pneu* à même de déterminer ses émissions sonores typiques à partir des données d'entrée pertinentes telles que la *largeur* et le *rayon du pneu*, le *profil*, la *qualité acoustique du revêtement* et la *dureté de la gomme*.

### 10.5.4 Calculs du niveau A

Pour calculer les niveaux A, il est nécessaire de pondérer les spectres déterminés ci-dessous avec la pondération A et de les additionner énergétiquement. On suppose pour ce faire les valeurs d'amplification données au tableau 10.8. Elles ont été obtenues pour chaque tiers d'octave à partir de la courbe de filtre A<sup>2</sup> en tant que valeurs moyennes de 11 points de fréquence répartis géométriquement. On notera qu'il peut en résulter de légères différences par rapport aux pondérations A appliquées à les fréquences centrales des tiers d'octave.

50 Hz	63 Hz	80 Hz	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz
-30.3	-26.3	-22.6	-19.2	-16.1	-13.4	-10.9	-8.6
315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz
-6.6	-4.8	-3.2	-1.9	-0.8	0.0	0.6	1.0
2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz	6300 Hz	8000 Hz	10000 Hz
1.2	1.3	1.2	1.0	0.5	-0.2	-1.2	-2.5

TABLE 10.8 – Pondération A pour les bandes de tiers d'octave en dB. Les valeurs positives correspondent à une amplification, les valeurs négatives à une atténuation.

---

2. IEC 61672-1 Electroacoustics - Sound level meters - Part 1 : Specifications (2013).

## 10.6 Relation à la vitesse du niveau A du bruit de propulsion et du bruit de roulement

Les figures 10.1 à 10.5 montrent la répartition des composantes du bruit dues à la propulsion et au roulement en fonction de la vitesse aux conditions de références (conduite constante sur une route horizontale dotée d'un revêtement ACMR8 ou SDA8-12 à une température de l'air de 10°C) en fonction des catégories de véhicules où des données sont disponibles. Le tableau 10.9 présente la liste des vitesses auxquelles les deux composantes sont également significatives.

cat 1	cat 2	cat 3	cat 4	cat 5	cat 6	cat 7	cat 8	cat 9	cat 10
48	58	22	< 20	27	47	27	39	43	43

TABLE 10.9 – Vitesses en km/h auxquelles la propulsion et le roulement participent pour une part égale aux émissions de bruit aux conditions de référence.

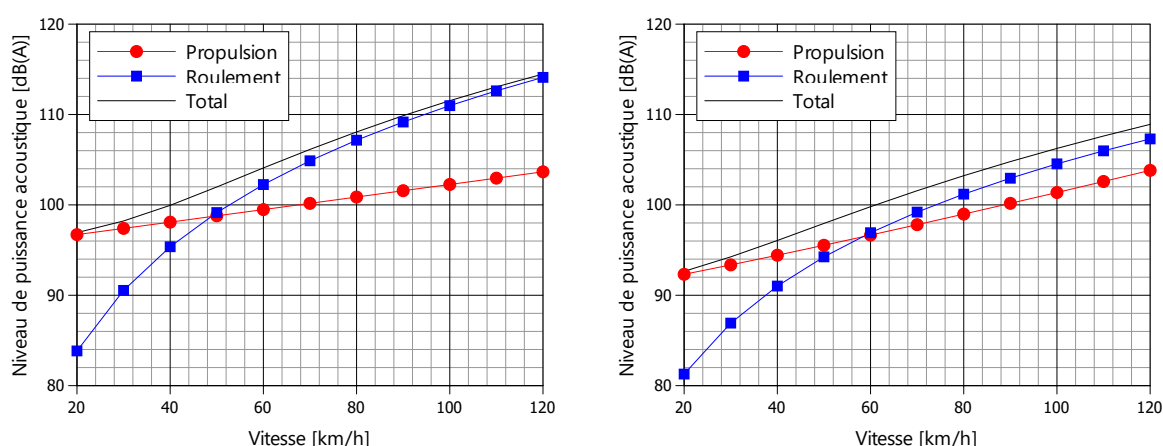


FIGURE 10.1 – Relations entre la vitesse et les composantes du bruit provenant de la propulsion et du roulement et puissance acoustique pondérée A totale pour les catégories SWISS 10 1 (à gauche) et 2 (à droite).

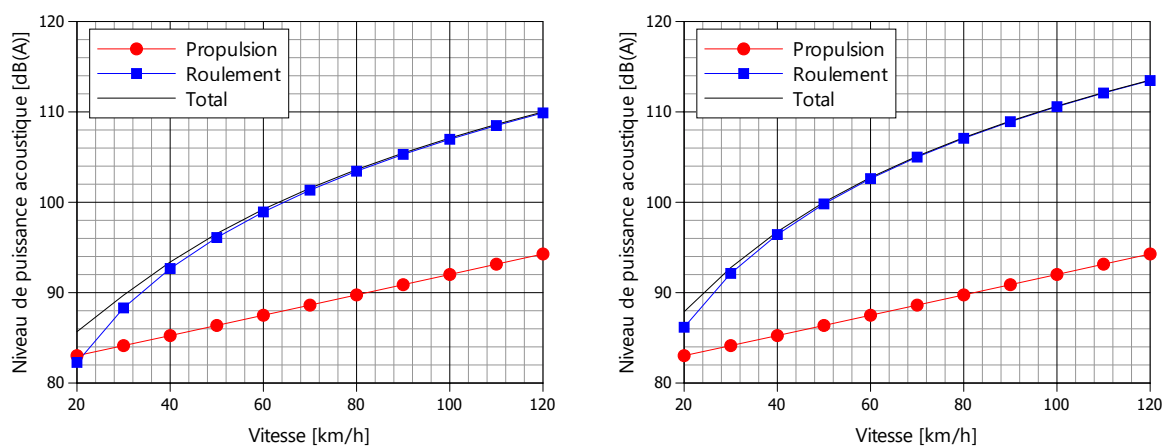


FIGURE 10.2 – Relations entre la vitesse et les composantes du bruit provenant de la propulsion et du roulement et puissance acoustique pondérée A totale pour les catégories SWISS 10 3 (à gauche) et 4 (à droite).

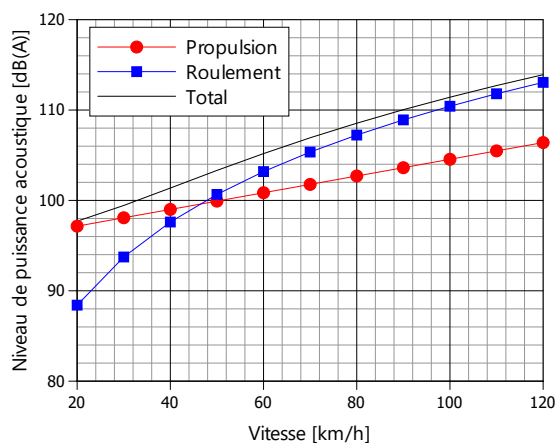
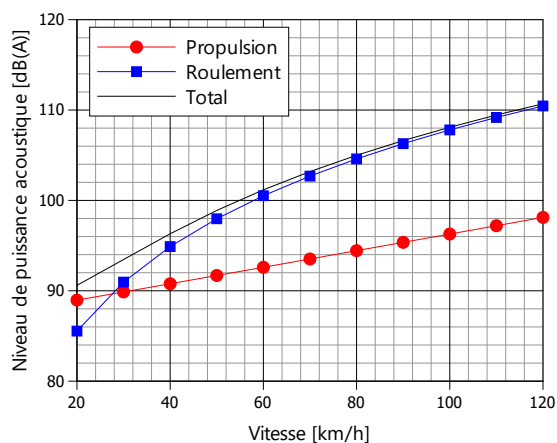


FIGURE 10.3 – Relations entre la vitesse et les composantes du bruit provenant de la propulsion et du roulement et puissance acoustique pondérée A totale pour les catégories SWISS 10 5 (à gauche) et 6 (à droite).

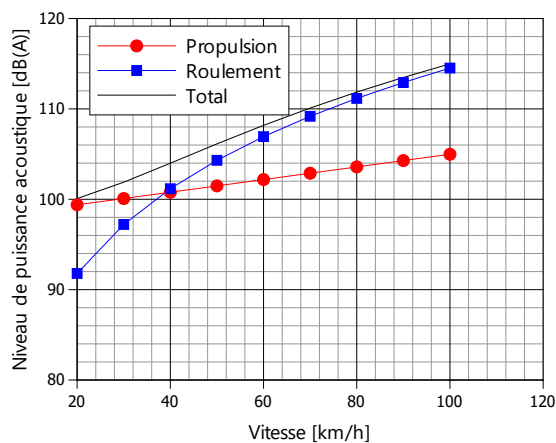
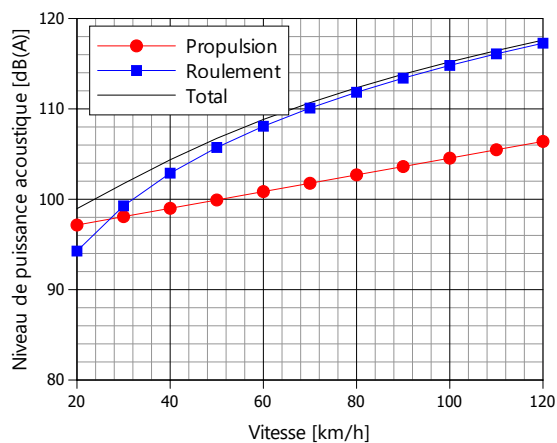


FIGURE 10.4 – Relations entre la vitesse et les composantes du bruit provenant de la propulsion et du roulement et puissance acoustique pondérée A totale pour les catégories SWISS 10 7 (à gauche) et 8 (à droite).

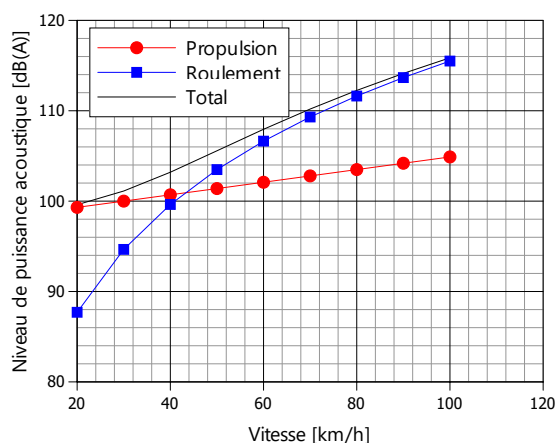
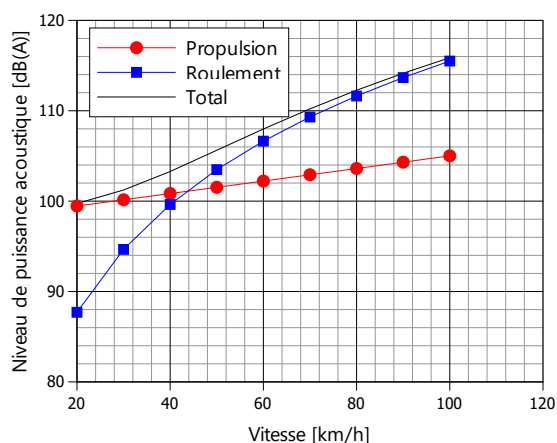


FIGURE 10.5 – Relations entre la vitesse et les composantes du bruit provenant de la propulsion et du roulement et puissance acoustique pondérée A totale pour les catégories SWISS 10 9 (à gauche) et 10 (à droite).

## 10.7 Pneus d'été et d'hiver

Les pneus de véhicules dont les propriétés matérielles se modifient en fonction de la température produisent un bruit qui dépend en principe de la température. Il en est tenu compte dans le modèle d'émission par le biais d'un terme de correction  $\Delta L_{W,R,temp}$ . IFEC ingegneria SA [37] a montré par des analyses SMA-E effectuées séparément pour les périodes estivale et hivernale de 2014 à 2016 qu'une normalisation de la température laisse subsister une différence saisonnière systématique d'au maximum 0.4 dB(A). On en déduit que les émissions causées par les pneus d'hiver ne sont pas sensiblement plus élevées que celles causées par les pneus d'été, et qu'il est possible de renoncer à une différenciation entre les pneus d'été et d'hiver.

## 10.8 Situations d'engorgement du trafic

Les formules décrites ci-dessus pour l'évaluation du bruit de propulsion et de roulement ne s'appliquant pas aux vitesses inférieures à 20 km/h. On se gardera d'utiliser ces équations en extrapolant  $v = 0$  pour les situations d'engorgement du trafic. Pour une estimation de la puissance acoustique émise par un véhicule à l'arrêt, on se reportera aux mesurages en roue libre effectués à Vauffelin (voir chapitre 5). Cette campagne de mesurage ne comprenant toutefois que des voitures de tourisme, il faut donc généraliser à l'ensemble des catégories la différence spectrale idéalisée constituée pour des véhicules de la catégorie SWISS 10 3.

$$\Delta L_{\text{Stau}}[3, i] = L_{W,0\text{km/h}}[3, i] - L_{W,\text{prop},20\text{km/h}}[3, i] \quad (10.9)$$

Avec  $L_{W,0\text{km/h}}[3, i]$  comme puissance acoustique déterminée à l'arrêt et  $L_{W,\text{prop},20\text{km/h}}[3, i]$  comme bruit de propulsion à 20 km/h. Le niveau de puissance acoustique dans une situation d'engorgement du trafic  $c$  est estimé en tant que

$$L_{W,0\text{km/h}}[c, i] = L_{W,\text{prop},20\text{km/h}}[c, i] + \Delta L_{\text{Stau}}[3, i] \quad (10.10)$$

La figure 10.6 montre la différence spectrale  $\Delta L_{\text{Stau}}[3, i]$  entre le niveau sonore mesuré et idéalisé.

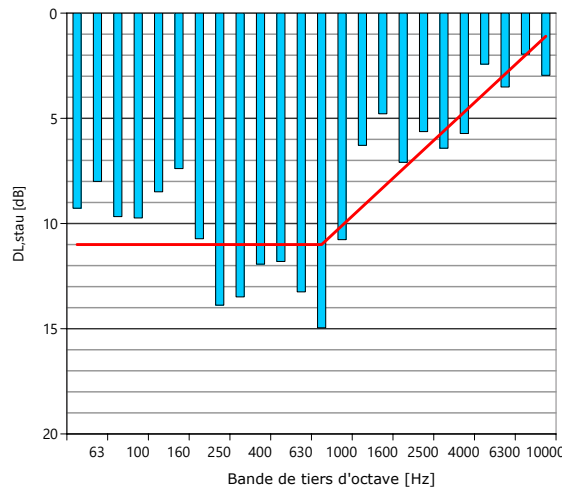


FIGURE 10.6 – Différences entre le niveau sonore mesuré (barre) et idéalisé (ligne) des mesurages à l'arrêt à Vauffelin et de la composante du bruit provenant de la propulsion pour des véhicules de catégorie SWISS-10 3 roulant à 20 km/h.

En appliquant cette différence de niveau, les composantes du bruit provenant de la propulsion à 20 km/h permettent d'obtenir au tableau 10.10 une estimation des niveaux sonores dans les situations d'engorgement du trafic  $L_{W,0\text{km/h}}[c, i]$  en fonction des catégories.

	cat1	cat2	cat3	cat4	cat5	cat6	cat7	cat8	cat9	cat10
50	88.5	87.4	80.0	80.0	84.5	81.0	81.0	88.9	89.5	88.0
63	87.0	88.5	76.5	76.5	85.5	81.0	81.0	90.5	94.9	94.5
80	85.0	88.7	75.5	75.5	78.5	81.0	81.0	88.0	91.0	89.5
100	81.4	88.7	68.4	68.4	71.6	77.3	77.3	84.5	84.4	83.1
125	85.9	90.3	66.9	66.9	70.6	77.3	77.3	83.9	86.1	84.9
160	80.0	84.0	67.4	67.4	71.6	77.3	77.3	82.8	82.6	82.6
200	80.2	78.0	66.0	66.0	69.4	75.4	75.4	79.6	79.4	77.1
250	81.5	72.3	66.5	66.5	69.4	75.4	75.4	81.7	81.7	79.5
315	80.7	67.6	66.0	66.0	69.4	75.4	75.4	83.3	83.3	82.2
400	82.0	69.2	64.3	64.3	69.4	75.4	75.4	81.4	81.4	82.8
500	77.7	70.0	64.3	64.3	67.9	75.4	75.4	83.4	83.4	84.5
630	76.8	71.2	66.8	66.8	66.9	75.4	75.4	82.8	82.8	81.6
800	77.9	70.2	65.8	65.8	73.4	78.2	78.2	81.0	81.0	81.3
1000	80.1	68.0	63.2	63.2	70.3	79.1	79.1	75.4	75.4	78.3
1250	75.4	69.1	59.1	59.1	66.7	80.0	80.0	73.2	73.2	77.2
1600	74.0	71.1	58.0	58.0	63.1	77.5	77.5	77.6	77.6	76.4
2000	72.3	69.6	60.4	60.4	67.5	78.4	78.4	79.1	79.1	75.3
2500	73.7	70.0	60.3	60.3	69.4	79.3	79.3	78.2	78.2	75.6
3150	72.8	70.9	61.7	61.7	69.8	73.8	73.8	76.8	76.8	76.0
4000	74.0	72.1	59.6	59.6	69.2	74.7	74.7	76.1	76.1	74.3
5000	72.5	73.7	57.0	57.0	68.6	75.6	75.6	76.0	76.0	70.5
6300	71.0	72.1	55.9	55.9	66.0	70.4	70.4	75.0	75.0	60.6
8000	71.5	71.4	52.8	52.8	63.4	71.3	71.3	73.8	73.8	54.4
10000	62.9	72.3	53.2	53.2	62.3	72.2	72.2	73.1	73.1	55.3

TABLE 10.10 – Niveau de puissance acoustique spectral  $L_{W,0\text{km/h}}[c, i]$  d'un véhicule à l'arrêt pour les catégories SWISS 10 1 à 10.

## 10.9 Variation des émissions en fonction des véhicules individuels

Pour reproduire la variation aléatoire des émissions en fonction des véhicules individuels, la puissance acoustique du véhicule  $L_W[c, i]'$  peut être décrite comme la somme de la puissance acoustique représentative  $L_W[c, i]$  et d'un terme de dispersion en moyenne neutre selon l'équation 10.11 :

$$L_W[c, i]' = L_W[c, i] + r[c] \quad [\text{dB}] \quad (10.11)$$

Où  $r[c]$  est un nombre aléatoire normalement distribué. Dans ce cas, l'influence de la vitesse est formellement exclue, car elle est décrite par le modèle lui-même. Pour  $r[c] = 0$ ,  $L_W[c, i]'$  représente la moyenne énergétique de la puissance acoustique de tous les véhicules d'une catégorie. Pour  $r[c]$ , on peut écrire :

$$r[c] = r_0[c] + n(\sigma[c]) = -0.115 (\sigma[c])^2 + n(\sigma[c]) \quad (10.12)$$

Où  $r_0[c]$  correspond à la différence entre la moyenne arithmétique et énergétique (voir l'annexe de la version intégrale du rapport) et  $n(\sigma[c])$  est un nombre aléatoire normalement distribué avec une valeur moyenne de 0 et un écart type  $\sigma[c]$ . Pour les situations où le bruit des pneus domine, on admettra les écarts type obtenus à partir des mesures SMA-E sur autoroute et indiqués au tableau 10.11.

cat 1	cat 2	cat 3	cat 4	cat 5	cat 6	cat 7	cat 8	cat 9	cat 10
2.2	2.4	1.6	1.7	1.7	1.8	2.2	2.7	1.7	1.7

TABLE 10.11 – Écarts type du niveau de puissance acoustique obtenus pour la conduite sur autoroute pour les catégories SWISS 10.

## 10.10 Estimation du niveau $L_{eq}$ à 1 m de distance

Pour permettre une comparaison avec les modèles d'émission qui donnent la force de la source comme niveau équivalent, il est possible de convertir la caractérisation comme puissance acoustique effectuée dans sonROAD18 telle que dérivée ici en  $L_{eq}$  à une distance de 1 m.

Sans tenir compte de l'atténuation due à l'air, négligeable dans des intervalles très courts, pour le passage d'une source ponctuelle dont on admet qu'elle est horizontale et omnidirectionnelle, on peut exprimer le carré de la pression acoustique  $p^2$  en fonction du temps  $t$  comme :

$$p^2(t) = \frac{W\rho c}{2\pi} \cdot \frac{1}{d^2 + (vt)^2} \quad (10.13)$$

Où :

$W$  : puissance acoustique émise par la source ponctuelle dans le demi-espace [W]

$\rho c$  : impédance de champ libre, produit de la densité de l'air et de la vitesse du son [ $\text{kg/m}^2\text{s}$ ]

$v$  : vitesse de la source [m/s]

$d = 1$  m : distance la plus courte entre le microphone et la source en déplacement [m]

Le niveau moyen  $L_{eq}$  pour un passage par heure correspond à l'intégration temporelle du carré de la puissance acoustique sur la durée de l'événement ( $-t_0 \dots +t_0$  avec  $t_0 \rightarrow \infty$ ) et la moyenne sur 3600 s :

$$L_{eq} = 10 \lg \left( \frac{1}{3600} \cdot \frac{W\rho c}{2\pi p_0^2} \int_{-t_0}^{+t_0} \frac{1}{1 + (vt)^2} dt \right) \quad (10.14)$$

Avec la substitution  $x = vt$ , il résulte que :

$$L_{eq} = 10 \lg \left( \frac{1}{3600} \cdot \frac{1}{v} \cdot \frac{W\rho c}{2\pi p_0^2} \int_{-x_0}^{+x_0} \frac{1}{1 + x^2} dx \right) \quad (10.15)$$

En appliquant



$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{1+x^2} dx = \pi \quad (10.16)$$

et

$$L_W = 10 \lg \left( \frac{W \rho c}{p_0^2} \right) \quad (10.17)$$

il en résulte comme niveau de puissance acoustique de la source

$$L_{eq} = L_W - 10 \lg(3600) - 10 \lg(v) - 10 \lg(2) \quad (10.18)$$

ou avec  $v$  en km/h

$$L_{eq} = L_W - 10 \lg(3600) - 10 \lg(v) - 10 \lg(2) + 10 \lg(3.6) = L_W - 10 \lg(v) - 33.0 \quad (10.19)$$

La relation 10.19 est valable pour un véhicule par heure. Avec une configuration à  $N$  véhicules par heure, on a

$$L_{eq} = L_W + 10 \lg \left( \frac{N}{v} \right) - 33.0 \quad (10.20)$$

# 11 Convertisseur SWISS 10

## 11.1 Introduction

SonROAD18 pronostique séparément les émissions acoustiques de chacune des catégories de véhicules SWISS 10 à partir de la vitesse. L'exactitude de la modélisation ne peut être assurée que si les informations disponibles sont suffisamment détaillées. Pour appliquer le modèle dans des situations où ces informations ne sont pas complètes, il faut se baser sur des estimations. Le convertisseur SWISS 10 présenté ci-dessous fournit un instrument pour répartir les volumes de trafic (figure 11.1).

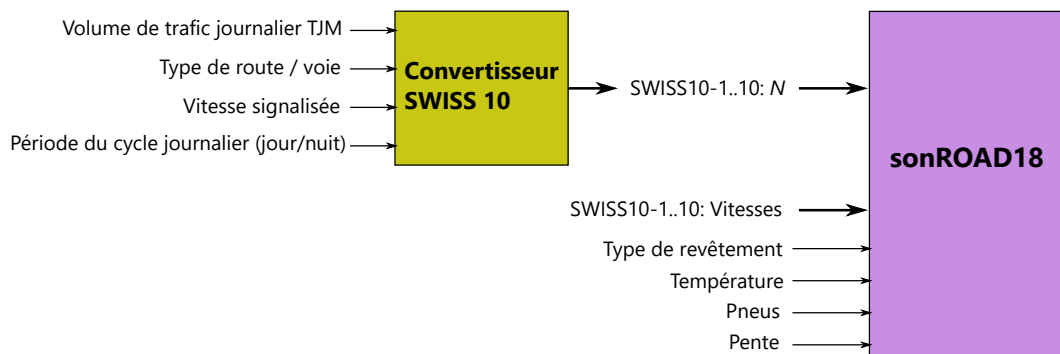


FIGURE 11.1 – Convertisseur SWISS 10.

Le convertisseur SWISS 10 permet d'obtenir des indications au sujet d'une voie de circulation sur une route d'un type donné. Se basant sur le trafic journalier moyen TJM de la route dans son ensemble (donc de toutes les voies additionnées), le convertisseur estime pour chaque voie les volumes de trafic horaire moyens en journée  $N_{\text{jour}}[c]$  et pendant la nuit  $N_{\text{nuit}}[c]$  en fonction de la catégorie de véhicule  $c$ . Pour information, on trouvera en annexe de la version intégrale du rapport final des évaluations ayant trait à la vitesse moyenne de conduite.

## 11.2 Classification des routes

La classification des routes se fonde sur la typologie établie par SN 640 040 b. Elle distingue les routes selon leurs fonctions :

**RGD** Routes à grand débit d'importance internationale à régionale avec fonction de transit

**RP** Routes principales d'importance nationale à intercommunale avec fonction de liaison

**RL** Routes de liaison d'importance régionale à intercommunale avec fonction de liaison

**RC** Routes collectrices d'importance locale avec fonction collectrice

**RD** Routes de desserte d'importance interne au quartier avec fonction de desserte

La caractérisation d'une route à grand débit RGD comprend en outre une indication du nombre total de voies, qui se situe la plupart du temps entre 2 et 6, et est typiquement de 4. Lorsque le nombre total de voies  $> 2$ , les volumes de trafic diffèrent d'une voie à l'autre. On distingue donc entre la voie normale  $N$  et la voie de dépassement  $U$ . La vitesse signalisée est également requise pour une caractérisation complète de tous les types de routes.

## 11.3 Base de données

La base de données pour le convertisseur SWISS 10 est constituée des protocoles d'événements ponctuels du comptage automatique du trafic routier SWISS 10 de l'OFROU (<http://vmch-ds2.cnlab.ch> : 2014-10

à 2015-10), des données de 2016 des postes de comptage SWISS 10 du canton de Zurich ainsi que des enquêtes effectuées en 2016 par la Ville de Coire par des méthodes d'ingénierie des transports [32]<sup>1</sup>. Pour les données de l'OFROU, la caractérisation des routes a été effectuée automatiquement via le nombre total de voies de circulation et la vitesse de conduite, pour celles de Coire et de Zurich, l'imputation a été entreprise manuellement par un ingénieur des transports et à l'aide des informations du navigateur SIG.

## 11.4 Évaluation

### 11.4.1 Volumes de trafic moyens

Le tableau 11.1 présente de manière distincte les volumes de trafic horaires moyens en pourcentage de TJM selon qu'ils concernent la nuit (22 h 00 - 06 h 00) ou le jour (06 h 00 - 22 h 00). La colonne *Nbre* désigne le nombre d'emplacements à disposition pour la statistique et *Code* décrit le type de route, le nombre de voies de circulation (pour les RGD), la situation de la voie de circulation (lorsque leur nombre est supérieur à 2) et la vitesse signalisée.

Exemple : pour les camions de cat 5, sur une RGD comprenant 4 voies, à une vitesse de 100 km/h, en journée et sur une voie normale (RGD-4-N-100, jour), on admet une proportion horaire d'environ 0.17 % du TJM. Sur une voie de dépassement, cette proportion est d'environ 0.09 %. Pour un TJM de 50'000 véh/24h, les camions de cat 5 circulant de jour sur une voie normale sont au nombre de 84, et de 47 sur une voie de dépassement. Sur l'ensemble de la section, en journée, il circule chaque heure  $2 \cdot 84 + 2 \cdot 47 = 262$  véhicules de cat 5.

Nbre	Code	Période	cat1	cat2	cat3	cat4	cat5	cat6	cat7	cat8	cat9	cat10
11	RC-30	jour	0.00000	0.14442	2.57137	0.00000	0.07656	0.00000	0.00000	0.08028	0.08478	0.00000
11	RC-30	nuit	0.00000	0.01637	0.29344	0.00000	0.00661	0.00000	0.00000	0.00766	0.01109	0.00000
60	RC-50	jour	0.00000	0.14363	2.50921	0.00000	0.10363	0.00000	0.00000	0.09302	0.09176	0.00000
60	RC-50	nuit	0.00000	0.01795	0.31354	0.00000	0.01029	0.00000	0.00000	0.01177	0.01395	0.00000
16	RL-50-60	jour	0.01267	0.07638	2.56133	0.01353	0.17548	0.01264	0.00530	0.04864	0.01859	0.00990
16	RL-50-60	nuit	0.00386	0.00777	0.34292	0.00068	0.01686	0.00069	0.00056	0.00361	0.00320	0.00099
12	RL-80	jour	0.01464	0.08314	2.54851	0.01430	0.16106	0.01125	0.00503	0.04360	0.02553	0.00918
12	RL-80	nuit	0.00326	0.00816	0.37083	0.00081	0.02031	0.00071	0.00072	0.00410	0.00777	0.00093
26	RP-50-60	jour	0.02069	0.08433	2.51915	0.01351	0.17121	0.01180	0.00710	0.04911	0.01357	0.01773
26	RP-50-60	nuit	0.00487	0.00764	0.38585	0.00099	0.02316	0.00110	0.00078	0.00465	0.00284	0.00229
15	RP-80	jour	0.01168	0.05438	2.50903	0.01777	0.15817	0.01350	0.01129	0.05929	0.01995	0.03406
15	RP-80	nuit	0.00278	0.00598	0.42098	0.00172	0.02472	0.00204	0.00075	0.00555	0.00425	0.00387
5	RGD-2-80	jour	0.02761	0.03726	2.28149	0.02659	0.33375	0.01518	0.00644	0.06218	0.03626	0.09110
5	RGD-2-80	nuit	0.00383	0.00236	0.35345	0.00430	0.05712	0.00379	0.00078	0.00921	0.00548	0.00921
10	RGD-2-100	jour	0.01105	0.02883	2.41976	0.01379	0.15818	0.01368	0.00890	0.04992	0.04598	0.09709
10	RGD-2-100	nuit	0.00232	0.00562	0.52573	0.00219	0.02849	0.00322	0.00129	0.00764	0.00859	0.01293
5	RGD-4-N-80	jour	0.00597	0.02930	1.56955	0.00814	0.12787	0.01059	0.00565	0.04816	0.01932	0.04146
5	RGD-4-U-80	jour	0.00074	0.02390	0.92049	0.00094	0.05167	0.00117	0.00072	0.00718	0.00111	0.00220
5	RGD-4-N-80	nuit	0.00158	0.00548	0.35830	0.00112	0.02172	0.00166	0.00065	0.00677	0.00407	0.00569
5	RGD-4-U-80	nuit	0.00009	0.00295	0.08396	0.00006	0.00366	0.00010	0.00004	0.00054	0.00015	0.00043
16	RGD-4-N-100	jour	0.00638	0.01899	1.49030	0.01245	0.16883	0.00893	0.00735	0.05194	0.02534	0.05492
16	RGD-4-U-100	jour	0.00125	0.01376	0.88923	0.00105	0.09353	0.00091	0.00050	0.00730	0.00263	0.01149
16	RGD-4-N-100	nuit	0.00153	0.00320	0.33369	0.00136	0.03169	0.00147	0.00105	0.00790	0.00673	0.00941
16	RGD-4-U-100	nuit	0.00029	0.00256	0.07936	0.00016	0.00853	0.00022	0.00009	0.00134	0.00064	0.00207
62	RGD-4-N-120	jour	0.00918	0.01996	1.43751	0.01334	0.18418	0.01177	0.00674	0.04195	0.02917	0.06122
62	RGD-4-U-120	jour	0.00063	0.01399	0.92151	0.00055	0.11418	0.00054	0.00025	0.00166	0.00088	0.00206
62	RGD-4-N-120	nuit	0.00201	0.00310	0.34964	0.00196	0.04041	0.00230	0.00108	0.00702	0.00825	0.01003
62	RGD-4-U-120	nuit	0.00006	0.00201	0.07537	0.00005	0.00930	0.00008	0.00003	0.00024	0.00022	0.00030

TABLE 11.1 – Volumes de trafic horaires moyens par voie de circulation pour les catégories SWISS 10 en pourcentage de TJM.

### 11.4.2 Dispersion des volumes de trafic

Les volumes de trafic moyens indiqués au tableau 11.1 peuvent subir des variations en fonction des emplacements. Le tableau 11.2 dresse la liste des écarts type observés aux emplacements évalués.

1. Les postes de comptage 2.10, 4.05, 4.06 et 5.16 n'ont pas été pris en compte en raison des incertitudes concernant l'attribution à des catégories de véhicules. Les proportions de motocycles ont été estimées comme moyennes à partir d'échantillons comptés manuellement, la classification automatique ne permettant pas de différencier entre motocycles et bicyclettes.

Nbre	Code	Période	cat1	cat2	cat3	cat4	cat5	cat6	cat7	cat8	cat9	cat10
11	RC-30	jour	0	43	13	0	59	0	0	30	181	0
11	RC-30	nuit	0	43	15	0	34	0	0	64	205	0
60	RC-50	jour	0	43	7	0	60	0	0	51	92	0
60	RC-50	nuit	0	43	23	0	68	0	0	69	137	0
16	RL-50-60	jour	128	26	4	53	42	45	55	49	124	85
16	RL-50-60	nuit	104	37	22	69	41	97	105	67	168	117
12	RL-80	jour	120	34	2	48	20	33	39	39	87	37
12	RL-80	nuit	154	28	15	48	33	78	90	31	105	72
26	RP-50-60	jour	150	66	6	49	33	38	65	38	79	84
26	RP-50-60	nuit	173	47	21	51	39	66	91	51	79	98
15	RP-80	jour	98	35	7	46	27	53	74	52	60	82
15	RP-80	nuit	122	33	21	65	39	115	66	49	81	70
5	RGD-2-80	jour	35	38	16	24	90	59	32	21	86	83
5	RGD-2-80	nuit	62	41	33	64	84	111	50	30	89	90
10	RGD-2-100	jour	75	31	9	64	33	96	85	63	96	105
10	RGD-2-100	nuit	137	56	48	88	65	131	114	90	121	133
5	RGD-4-N-80	jour	31	62	22	55	42	43	32	17	53	75
5	RGD-4-U-80	jour	65	87	23	42	31	48	162	146	140	127
5	RGD-4-N-80	nuit	39	57	19	79	34	75	65	37	63	56
5	RGD-4-U-80	nuit	113	76	61	71	36	70	97	70	97	127
16	RGD-4-N-100	jour	52	41	22	50	43	70	58	37	66	74
16	RGD-4-U-100	jour	176	32	28	210	47	316	353	221	382	350
16	RGD-4-N-100	nuit	65	33	26	69	40	93	67	49	92	83
16	RGD-4-U-100	nuit	318	72	66	333	83	431	390	288	380	356
62	RGD-4-N-120	jour	59	35	25	46	42	43	40	23	52	64
62	RGD-4-U-120	jour	123	34	28	135	54	224	408	235	376	372
62	RGD-4-N-120	nuit	73	38	18	90	48	74	63	41	76	65
62	RGD-4-U-120	nuit	222	60	64	203	91	312	438	294	469	456

TABLE 11.2 – Écarts type spécifiques aux emplacements des dispersions des volumes de trafic horaire par voie de circulation en fonction des catégories SWISS 10 en pourcentage de la moyenne.

## 11.5 Fonctions de dispersion et de contraction des écarts temporels

Lorsque les considérations ne portent que sur l'énergie, par exemple pour les calculs du Leq, la disposition des véhicules le long de la voie ne joue aucun rôle. Pour élaborer des statistiques du niveau maximum ou examiner les fluctuations de niveau ou d'autres caractéristiques temporelles, les statistiques concernant la disposition des véhicules le long de la voie sont toutefois nécessaires. Cet aspect a été étudié ici à l'aide des données du trafic de l'OFROU en se servant de l'écart temporel  $\Delta t$  entre deux véhicules voisins dans un trafic fluide. Pour ce faire, on a établi des statistiques représentant la fonction de dispersion et de contraction de  $\Delta t$  pour chaque voie de circulation et volume de trafic horaire par voie. Chacune de ces fonctions a été approximée par une distribution de Weibull à trois paramètres, afin de permettre une description compacte.

La distribution de Weibull est décrite par les trois paramètres  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\mu$  et présente pour  $x \geq \mu$  une fonction de contraction  $f(x)$  selon l'éq. 11.1 et une fonction de dispersion  $F(x)$  selon l'éq. 11.2 (pour  $x < \mu$  les valeurs de la fonction = 0).

$$f(x) = \frac{\alpha}{\beta} \left( \frac{x - \mu}{\beta} \right)^{\alpha-1} \cdot e^{-\left(\frac{x-\mu}{\beta}\right)^\alpha} \quad (11.1)$$

$$F(x) = 1 - \exp \left( - \left( \frac{x - \mu}{\beta} \right)^\alpha \right) \quad (11.2)$$

La figure 11.2 montre à titre d'exemple les fonctions de contraction mesurées pour  $\Delta t$  sur une route principale (RP) à une vitesse de 80 km/h avec deux volumes de trafic différents et l'approximation par une répartition de Weibull.

On trouvera en annexe de la version intégrale du rapport final la liste des paramètres de la distribution de Weibull correspondants aux différents types de routes et volumes de trafic. Ils peuvent être utilisés pour les micro-simulations des flux de trafic et le calcul des caractéristiques des signaux acoustiques qui en résultent.

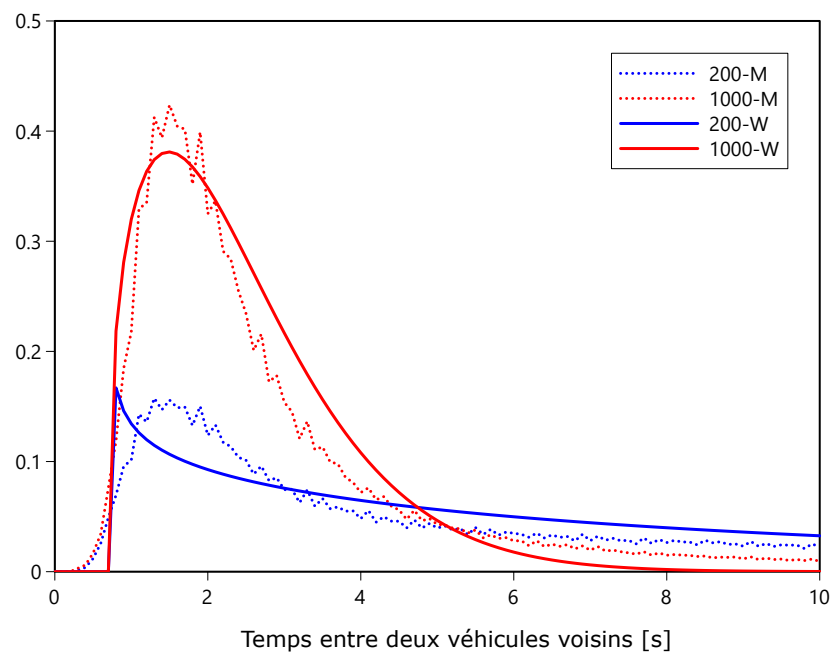


FIGURE 11.2 – Fonction de contraction mesurée sur une voie de circulation d'une route principale (RP) typique à une vitesse de 80 km/h (M) et approximée par une distribution de Weibull (W) pour  $\Delta t$  comme écart temporel entre deux véhicules voisins pour deux volumes de trafic de 200 et 1000 véh/h (rapportés à une seule voie) choisis à titre d'exemple.

# 12 Validation du modèle

## 12.1 Mesurages de validation

Afin de valider le modèle d'émission sonROAD18, les calculs ont été comparés à des mesurages. Pour ce faire, ont été pris en considération que des mesurages n'ayant pas été utilisés directement pour le réglage des paramètres du modèle. La comparaison a été effectuée à partir du niveau équivalent calculé et mesuré sur une courte période (de 30 minutes à 48 heures) à proximité de la route. Les types de routes ci-dessous ont été pris en compte et examinés à au moins trois emplacements :

- Route limitée à 30 km/h, horizontale
- Route principale à l'intérieur d'une localité, limitée à 50 km/h, horizontale
- Route principale à l'intérieur d'une localité, limitée à 50 km/h, pente > 7%
- Route principale à l'extérieur des localités, limitée à 80 km/h, horizontale
- Autoroute, 120km/h, horizontale

Plusieurs données de mesurages existantes et disponibles ont été utilisées à cette fin, et des mesurages supplémentaires ont été effectués par l'Empa :

- Mesurages en ville de Zurich, effectués par Basler + Hofmann en 2013 [38] et par Grolimund + Partner AG en 2009 [39]
- Mesurages à 30 km/h en ville de Zurich et dans le canton d'Argovie, effectués par Grolimund + Partner AG [40]
- Mesurages au passage sur différents revêtements effectués par Grolimund + Partner AG (plus récent que 2010) [31]
- Mesurages SMA-E, 2016 (voir chapitre 4)
- Mesurages de l'Empa effectués en 2016 (voir chapitre 8) et en 2017 (voir chapitre 5)

Tous les mesurages utilisés pour la validation sont rassemblés au tableau 12.1. Les points de mesurage se situent pour la plupart à env. 7.5 m du milieu de la route ou de la voie de circulation. Les données du trafic disponibles présentent un degré de précision très variable. Ces données, y compris les vitesses, ont donc été réparties dans les catégories correspondantes du tableau 12.1 :

**Q1** Volume de trafic par voie connu pour toutes les catégories SWISS 10.

**Q2** Volume de trafic par voie connu pour 7 catégories (CH07), répartition des voitures de livraison dans les cat. 5, 6, 7 selon le convertisseur SWISS 10 (93, 4, 3 %).

**Q3** 4 catégories (2, 3, voitures de livraisons, 8) connues, cat. 1, 4, 9, 10 supposées 0, répartition des cat. 5, 6, 7 selon le convertisseur SWISS 10 (91, 6, 3 %), hypothèse de 50 % du trafic par voie.

**Q4** Répartition dans les cat. 3 et 8 disponible, hypothèse de 50 % du trafic par voie.

**Q5** Uniquement TJM disponible, répartition dans les cat. 3 et 8 selon OPB, hypothèse de 50 % du trafic par voie.

**v-q1** Vitesse de conduite effective connue pour les catégories SWISS 10.

**v-q2** Vitesse de conduire moyenne connue.

**v-q3** Vitesses déterminées à partir des moyennes annuelles de la vitesse de conduite effective.

En principe, les calculs ont été effectués avec les vitesses de conduite effectives moyennes - lorsque celles-ci étaient disponibles. Comme la correction de la pente selon CNOSSOS prend déjà en compte une vitesse modifiée, les calculs des trois emplacements présentant une pente > 7 % ont été effectués avec la vitesse signalisée.

À l'exception des autoroutes, des mesurages de température sont disponibles pour les dates de mesurage. Pour les trois sites autoroutiers, la température de référence a été fixée à 10°C et on a choisi une période de validation de deux jours présentant une température typique de 10°C (mi-mars et fin octobre). Sur ces sites,

un point de mesurage a été établi des deux côtés de la route et on a effectué la moyenne arithmétique des résultats des deux points de mesurage.

Aucun des emplacements choisis pour la validation ne se trouve à 100 m ou moins d'un carrefour ou d'un giratoire. La correction pour conduite en accélération ou décélération ne peut donc pas être validée. Outre des mesurages sur divers sites, on disposait des mesurages SPB de Grolimund + Partner effectués sur différents revêtements depuis le 01.01.2010 [31]. Ces données sont regroupées selon les types de véhicules (VT, camions, véhicules articulés) et couvrent des vitesses allant de 40 à 130 km/h. Ces données sont des moyennes calculées à partir de différents emplacements, raison pour laquelle il n'est pas possible d'effectuer de corrections pour les pentes éventuelles, accélérations ou ralentissements et influences de la température. De plus, il faut compter avec une incertitude plus élevée due au fait que la distance de mesurage n'était que de 5 m. Ces données comprennent enfin un nombre inhabituel de cas particuliers, c'est-à-dire des mesurages effectués dans des conditions de revêtement extrêmes - par exemple revêtement venant d'être posé - ou des mesurages n'ayant pas fonctionné. C'est pourquoi ce fichier de données est évalué séparément.

Emplacement	v-sig [km/h]	Pente [%]	Revêtement	Mesurage	Données du trafic	Grandeurs de mesurage
Kalchbühl- strasse, Zürich	30	3	Densité de la couche de revêtement (cal- culs : AC 11)	G + P, 2009	Q4, v-q2	$L_{eq,A}$ Tag
Kappel a.A.	30	0	ACMR 8	G + P, 2015	Q1, v-q1	$L_{eq,A}$ (1Fz./h)
Ottenbach	30	5	ACMR 8	G + P, 2015	Q1, v-q1	$L_{eq,A}$ (1Fz./h)
Butzenstrasse, Zürich	50	7	AC 11S	B + H, 2013	Q3, v-q2	$L_{eq,A}$ 1h
Hegibachstrasse, Zürich	50	5	AC 8S	B + H, 2013	Q3, v-q2	$L_{eq,A}$ 1h
Kalchbühl- strasse, Zürich	50	3	Densité de la couche de revêtement (cal- culs : AC 11)	G + P, 2009	Q4, v :q2	$L_{eq,A}$ Tag
Leimbachstrasse, Zürich	50	6	SMA 11	B + H, 2013	Q3, v-q2	$L_{eq,A}$ 1h
Letzigraben, Zürich	50	0	AB 11	B + H, 2013	Q3, v-q2	$L_{eq,A}$ 1h
Fällanden	50	7.2	AC 11 (2012)	Empa, 2017	Q1, v-q2	$L_{eq,A}$ 0.5h
Gsteigstrasse, Zürich	50	13	SMA 11 (2004)	Empa, 2017	Q1, v-q2	$L_{eq,A}$ 0.5h
Tobelhofstrasse, Zürich	50	7.5	AB 11	Empa, 2017	Q1, v-q2	$L_{eq,A}$ 0.5h
Magden	80	0	AC 11 (2000)	Empa, 2016	Q5, v-q2	$L_{eq,A}$ 0.75h
Mellikon	80	0	PMA (2014)	Empa, 2016	Q5, v-q2	$L_{eq,A}$ 0.75h
Rümikon	80	2	ACMR 8 (2010)	Empa, 2016	Q4, v-q2	$L_{eq,A}$ 0.75h
Rothenbrunnen	100	0	SDA 8 (2013)	MFM-U, 2016	Q2, v-q3	$L_{eq,A}$ 48h
Camignolo	120	0	SDA 8 (2013)	MFM-U, 2016	Q2, v-q3	$L_{eq,A}$ 48h
Reiden	120	0	SMA 11 (< 2003)	MFM-U, 2016	Q2, v-q3	$L_{eq,A}$ 48h
Mesurages SPB regroupés en fonction du revêtement [31] :						
Divers	40-110	—	AC 11	G + P, >2010		$L_{eq,A}$ (1Fz./h)
Divers	40-130	—	ACMR 8	G + P, >2010		$L_{eq,A}$ (1Fz./h)
Divers	40-80	—	SDA 4	G + P, >2010		$L_{eq,A}$ (1Fz./h)
Divers	40-90	—	SDA 8	G + P, >2010		$L_{eq,A}$ (1Fz./h)

TABLE 12.1 – Vue d'ensemble des mesurages utilisés pour la validation. Concernant les degrés de qualité des données du trafic et les vitesses, se reporter au texte.

## 12.2 Calcul du niveau équivalent $L_{eq}$

Dans certains cas utilisés pour la validation, seule est connue la répartition entre VT (N1) et véhicules lourds (N2) (données du trafic Q4 dans le tableau 12.1). De même, les données regroupées en fonction du revêtement ne font état que de trois catégories de véhicules (VT, camions, semi-remorques). Ces types de véhicules ont été attribués comme suit aux catégories SWISS 10.

- VT = cat. 3 de SWISS 10
- Véhicules lourds / camions = cat. 8 de SWISS 10
- Semi-remorques = cat. 10 de SWISS 10

Dans les situations où les données du trafic ne contenaient pas d'indications précises concernant les voies, le trafic a été réparti de façon égale entre les différentes voies. Les calculs ont ensuite été effectués en tenant compte de la voie, c'est-à-dire en postulant pour chaque voie une source linéaire au milieu de la chaussée.

Le calcul de la puissance acoustique totale par m d'une source linéaire a été effectué avec  $v'$  : vitesse en m/s et  $v$  : vitesse en km/h selon la formule 12.1, les corrections obtenues par l'optimisation des paramètres selon le chapitre 9 ayant été appliquées en tant qu'influence du revêtement.

$$L_{W',eq,line[c,i]} = L_{W[c,i]} + 10 \lg \left( \frac{N[c]}{3600 \cdot v'[c]} \right) = L_{W[c,i]} + 10 \lg \left( \frac{N[c]}{1000 \cdot v[c]} \right) \quad (12.1)$$

Le niveau moyen  $L_{eq,A}$  a ensuite été calculé sur 1 heure à chaque point de mesurage pour servir de grandeur de validation. Une intégration numérique a également été effectuée, où on a supposé une route longue de 100 m avec une source ponctuelle dotée d'une puissance acoustique  $L_{W',eq,line[c,i]}$  pour chaque mètre. La dilution géométrique et l'atténuation due à l'air ont été prises en compte en tant qu'effets de propagation. L'atténuation due à l'air dépend de l'état de l'air, de la fréquence  $f$  et de la distance  $d$  et elle se calcule au moyen de l'équation 12.2. Pour la déterminer, on a supposé à des fins de simplification une température de l'air de  $+8^\circ\text{C}$  et une humidité relative de l'air de 76 %. Les coefficients d'absorption atmosphériques correspondants  $\alpha_f$  sont donnés au tableau 12.2.

$$A_{atm,f} = \alpha_f \frac{d}{1000} \quad (12.2)$$

Fréquence	$\alpha_f$	Fréquence	$\alpha_f$	Fréquence	$\alpha_f$
50	0.1	315	1.2	2000	9.7
63	0.1	400	1.5	2500	14.3
80	0.2	500	1.8	3150	21.6
100	0.3	630	2.2	4000	33.6
125	0.4	800	2.7	5000	50.9
160	0.6	1000	3.5	6300	77.9
200	0.8	1250	4.7	8000	119.8
250	1	1600	6.8	10000	176.2

TABLE 12.2 – Coefficient  $\alpha_f$  d'absorption atmosphérique en dB/km pour une température de  $8^\circ\text{C}$  et une humidité de l'air relative de 76 % en fonction de la fréquence centrale de tiers d'octave.

## 12.3 Résultats de la validation

Le tableau 12.3 indique les  $L_{eq,A}$  mesurés et calculés ainsi que les différences entre les cas utilisés pour la validation aux différents emplacements. Pour les trois emplacements à 80 km/h, aucune donnée du trafic n'était disponible spécifiquement pour les périodes de mesurage. Les TJM disponibles datent de 2006 (Magden), 1997 (Mellikon) et 2014 (Rümikon). Ces chiffres non actuels expliquent en partie la sous-estimation des valeurs de mesurage. Dans le cas des trois emplacements avec pente, les calculs semblent également légèrement sous-estimer les émissions, ceci malgré un calcul avec les vitesses signalisées.

L'écart entre le  $L_{eq,A}$  -0.8 dB(A) calculé et mesuré est en moyenne de -0.8 dB(A) (moyenne des écarts absolus : -1.1 dB(A)). Les différences entre les calculs et les mesurages vont de -1.9 à +1.0 dB(A). Pour tous



les 17 cas de validation, l'erreur de racine carrée selon l'équation 12.3 est de 1.2 dB(A).

$$\Psi = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (L_{\text{Berechnung},i} - L_{\text{Messung},i})^2} \quad (12.3)$$

Pour les données regroupées en fonction du revêtement, l'écart moyen entre le  $L_{eq,A}$  calculé et mesuré est de +0.3 dB(A) (moyenne des écarts absolus : -1.3 dB(A)). Le tableau 12.4 indique les valeurs séparément pour les différentes catégories de revêtements et de véhicules (pondérées en fonction des différentes catégories de vitesse). Les différences entre le mesurage et le calcul pour chaque catégorie de vitesse vont de -3.9 à +2.5 dB(A). L'erreur de racine carrée pour toutes les données de validation regroupées en fonction du revêtement est de 1.5 dB(A).

La figure 12.1 1 montre les différences entre calcul et mesurage sous forme de diagramme en boîtes. Pour les données regroupées en fonction du revêtement, on constate des écarts entre le mesurage et le calcul parfois nettement plus élevés. Cela s'explique d'une part par des différences au sein d'un même type de revêtement et d'autre part par l'insuffisance des connaissances et donc des possibilités de correction concernant les pentes éventuelles, accélérations ou ralentissements et influences de la température.

En fusionnant les deux fichiers de données, on obtient pour la comparaison du calcul moins le mesurage un écart moyen de -0.3 dB(A). Cette différence résiduelle se situe dans l'ordre de grandeur de l'incertitude fondamentale inhérente à la collecte des données et elle est donc satisfaisante. La comparaison démontre simultanément l'incertitude à prendre en compte dans les cas individuels.

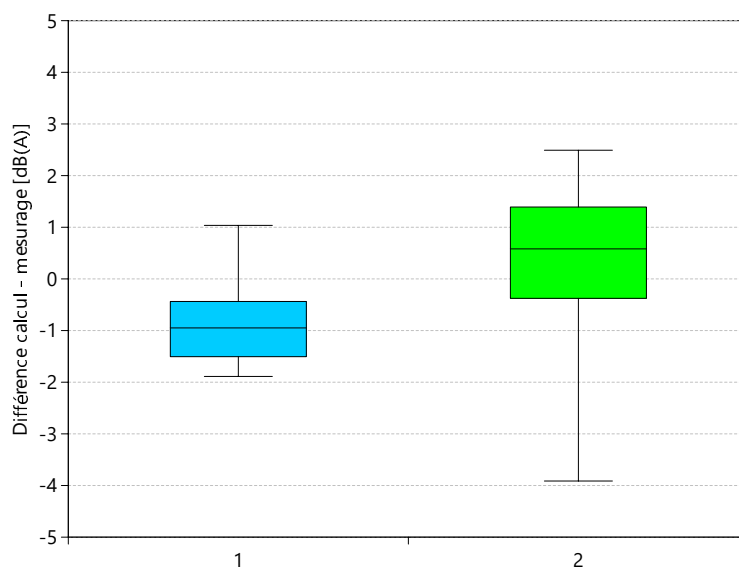


FIGURE 12.1 – Différences entre calculs et mesurages. Le diagramme montre la médiane (ligne horizontale dans les boîtes), le quantile à 25 % et à 75 % (bords inférieur et supérieur des boîtes) et la fourchette entre les valeurs les plus basses et les plus élevées. Le groupe de données en bleu (1) correspond aux différents emplacements de validation, le groupe vert (2) aux données regroupées en fonction du revêtement.

	Emplacement	Revêtement	Calcul dB(A)	Mesurage dB(A)	Calcul - mesurage dB(A)
30 km/h, horizontale	Kalchbühlstrasse	AC 11	56.4	55.4	1.0
	Kappel	ACMR 8	39.2	39.6	-0.4
	Ottenbach	ACMR 8	34.0	33.0	1.0
50 km/h, horizontale	Butzenstrasse, ZH	AC 11S	62.1	63.0	-0.9
	Hegibachstrasse, ZH	AC 8S	67.5	69.0	-1.5
	Kalchbühlstrasse, ZH	AC 11	57.8	58.8	-1.0
	Leimbachstrasse, ZH	SMA 11	62.1	63.0	-0.9
	Letzigraben, ZH	AB 11	58.4	59.0	-0.6
	Fällanden	AC 11	68.9	70.8	-1.9
50 km/h, pente > 7 %	Gsteigstrasse, ZH	SMA 11	68.2	69.5	-1.3
	Tobelhofstrasse, ZH	AB 11	66.2	67.9	-1.7
	Magden	AC 11	66.2	66.8	-0.6
80 km/h, horizontale	Mellikon	PMA	71.8	73.1	-1.2
	Rümikon	ACMR 8	71.3	73.0	-1.7
	Rothenbrunnen	SDA 8	69.9	71.5	-1.6
120 km/h, horizontale	Camignolo	SDA 8	76.9	77.1	-0.1
	Reiden	SAM 11	81.2	80.6	0.5

TABLE 12.3 – Résultats de la validation.

Revêtement	Cat. SWISS 10	Calcul - mesurage dB(A)
AC11	3	1.5
	8	0.8
	10	—
ACMR8	3	1.4
	8	0.8
	10	0.5
SDA4	3	-2.8
	8	-1.3
	10	-2.1
SDA8	3	0.4
	8	0.4
	10	0.3

TABLE 12.4 – Différences moyennes entre les calculs et les mesurages regroupés en fonction du revêtement. Il faut noter que la représentativité de l'échantillon n'est pas garantie au sein de chaque catégorie de revêtement. Les valeurs sont pondérées avec les différentes catégories de vitesse.

# 13 Incertitude du modèle

L'estimation de l'incertitude du modèle sonROAD18 qui va suivre fournit une indication sur le niveau pondéré A équivalent en énergie  $L_{eq,A}$  pronostiqué à un emplacement à partir d'un large échantillon de véhicules. Deux aspects déterminent l'incertitude du pronostic :

**Les erreurs du modèle** résultent des incertitudes de la modélisation empirique et du fait que d'autres effets et facteurs peuvent n'avoir pas été pris en compte.

**Les erreurs des données d'entrée** résultent de données d'entrée absentes ou imprécises.

## 13.1 Erreurs du modèle

Les erreurs du modèle décrivent l'incertitude des pronostics des niveaux d'émissions inhérente au modèle lorsque toutes les données d'entrée nécessaires sont disponibles<sup>1</sup>. Les considérations se limitent aux situations d'exploitation stationnaires et excluent donc les véhicules en accélération. Une caractérisation complète de la situation comprend donc :

- Les vitesses moyennes par catégories de véhicule
- Les volumes de véhicules par catégories de véhicule
- Le type de revêtement
- La déclivité de la route
- La température de l'air

En s'appuyant sur la dérivation des paramètres de modèle et la validation du modèle (chapitre 12) sous condition d'une description complète de la situation, on peut estimer l'erreur de modèle à **1.5 dB(A)** dans le sens d'un écart type.

Étant donné que le bruit de roulement contribue pour une part importante au bruit total dans de nombreux cas, la connaissance incomplète de la correction exacte du revêtement est en grande partie responsable de l'incertitude du modèle. Comme le montrent les mesurages, les émissions peuvent présenter des variations significatives à l'intérieur d'une même catégorie de revêtement. Pour la caractérisation du revêtement, l'idéal est de disposer d'un échantillon suffisamment important de mesurages SPB et de la correction du revêtement qui en résulte. Les valeurs de corrections du revêtement peuvent alternativement être obtenues à partir des mesurages CPX, mais la nécessité de convertir des valeurs CPX en données SPB entraîne elle-même une part d'incertitude.

## 13.2 Erreurs des données d'entrée

Utilisées pour la cartographie du bruit, les données d'entrée du modèle pour la détermination des émissions ne présentent généralement pas le volume et le degré de précision décrits plus haut. La signification des différents paramètres pour le résultat peut être examinée au moyen d'une analyse de sensibilité.

On désigne ici par fonction de modèle  $f$  le pronostic du niveau moyen équivalent en énergie pondéré A  $L_{eq,A}$  à un point de réception sur sol dur à une distance de référence de 7.5 m (voir éq. 10.20) :

$$L_{eq,A} = 10 \lg \left( \sum_{c=1}^{10} \frac{N[c]}{v[c]} \cdot \sum_{i=1}^n 10^{0.1(L_W[c,i] + A'[i])} \right) + \Delta \quad (13.1)$$

Où  $i$  représente le numéro de bande de tiers d'octave,  $c$  la catégorie de véhicule,  $N[c]$  et  $v[c]$  le nombre de véhicules par heure et la vitesse pour chaque catégorie,  $L_W[c,i]$  le niveau de puissance acoustique pour un véhicule de la catégorie  $c$  dans la bande de tiers d'octave  $i$ ,  $A'[i]$  la pondération A incluant l'absorption de

---

1. Concernant la caractérisation du revêtement, elle n'implique ici que la connaissance du type de revêtement.

l'air dans la bande de tiers d'octave  $i$  et finalement  $\Delta$  comme une constante.

Pour évaluer numériquement la sensibilité de la fonction du modèle en regard des différentes données d'entrée, il est nécessaire de spécifier un point de travail. Trois situations prototypes sont définies à cette fin avec les paramètres correspondants du convertisseur SWISS 10 selon le tableau 11.1 :

**Route collectrice, 30 km/h** voie d'une route collectrice avec une vitesse signalisée  $v_s$  de 30 km/h sur un revêtement ACMR8/SDA8-12 et un volume de trafic correspondant à RC-30 nuit.

**Route de liaison, 50 km/h** voie d'une route de liaison avec une vitesse signalisée  $v_s$  de 50 km/h sur un revêtement ACMR8/SDA8-12 et un volume de trafic correspondant à RL-50 nuit.

**Route à grand débit, 120 km/h** voie d'une route à grand débit avec une vitesse signalisée  $v_s$  de 120 km/h sur un revêtement ACMR8/SDA8-12 et un volume de trafic correspondant à RGD-4-N-120 nuit.

Le tableau 13.1 montre les sensibilités qui en résultent.

Paramètres	RC-30	RL-50	RGD-4-N-120	
Vitesse $v_s$	0.5	0.9	1.2	dB/10%
Pente $s$	1.7	1.1	0.5	dB/10%
Revêtement $\Delta L_{W,R,road}$	0.5	0.8	1.0	dB/1dB
Température $T$	-0.3	-0.6	-0.70	dB/10C
Volume de trafic $N$	0.41	0.41	0.41	dB/10%

TABLE 13.1 – Analyse de la sensibilité d'un calcul du  $L_{eq,A}$  pour trois situations prototypes, compte tenu de différents paramètres d'entrée. Il est à noter que la sensibilité à la déclivité montre la différence d'une pente de + 10 % par rapport à une route horizontale. Comme la correction de la pente n'est pas fortement interlinéaire, elle ne permet pas d'interpolier ou d'extrapoler automatiquement d'autres deltas.

# 14 Exemples de calcul

Les exemples de calcul comprennent les quatre niveaux de vitesse 30, 50, 80 et 120 km/h et font intervenir l'ensemble des formules qui entrent dans la détermination de l'émission, en particulier la directivité verticale. Les données d'entrée ont été sélectionnées afin que toutes les situations de calcul (différentes corrections) se présentent si possible au moins une fois. Les exemples sont donc théoriques et ne correspondent pas à des situations réelles, mais servent à tester l'implémentation du modèle. Le tableau 14.1 offre une vue d'ensemble des données d'entrée des quatre exemples de calcul. Pour les corrections de revêtement, on a introduit dans le calcul les valeurs indiquées au chapitre 9.

Exemple de calcul	A	B	C	D
Volume de trafic N[1]	1	1	1	3
Volume de trafic N[2]	2	5	5	5
Volume de trafic N[3]	70	100	200	450
Volume de trafic N[4]	1	1	1	1
Volume de trafic N[5]	5	10	10	50
Volume de trafic N[6]	1	2	5	30
Volume de trafic N[7]	1	1	1	10
Volume de trafic N[8]	5	10	20	35
Volume de trafic N[9]	1	1	5	60
Volume de trafic N[10]	1	1	1	40
Vitesse v[1]	30	50	80	93
Vitesse v[2]	30	50	80	110
Vitesse v[3]	30	50	80	120
Vitesse v[4]	30	50	80	90
Vitesse v[5]	30	50	80	120
Vitesse v[6]	30	50	80	90
Vitesse v[7]	30	50	80	90
Vitesse v[8]	30	50	80	90
Vitesse v[9]	30	50	80	90
Vitesse v[10]	30	50	80	90
Revêtement	ACMR8	SDA4	PMA	Beton
Pente $s$ [%]	0	-5	10	2
Température de l'air [°C]	10	10	15	25
Angle $\theta$ (Q – Mp) [°]	10	20	45	60

TABLE 14.1 – Données d'entrée pour les quatre exemples de calcul. Pour chaque exemple, on calcule une voie de circulation théorique, c'est-à-dire que le volume de trafic, la vitesse, etc. se rapportent à une voie.

Le calcul de la puissance acoustique totale d'une source linéaire par mètre s'effectue selon la formule 12.1. Les résultats sont rassemblés en annexe de la version intégrale du rapport final.

# 15 Caractérisation du revêtement par mesurages SPB

## 15.1 Concept

L'influence du revêtement, ou terme de correction  $\Delta L_{W,R,road}[i]$ , peut être déterminée en tenant compte des spécificités de la situation par le mesurage d'événements sonores produits par le passage des véhicules dans un trafic fluide selon la géométrie de référence 7.5 m / 1.2 m au-dessus d'un sol dur. En se référant à l'énergie de l'événement comme grandeur descriptive du phénomène acoustique, cette méthode se distingue de la procédure normalisée ISO 11819-1 (Akustik - Messung des Einflusses von Strassenoberflächen auf Verkehrsgerausche - Teil 1 : Statistisches Vorbeifahrtverfahren), basée sur le niveau maximum.

L'évaluation requiert des paires de données relatives aux vitesses et aux énergies spectrales de  $N$  passages valides. En partant d'une dispersion des véhicules individuels correspondant à un écart type  $\sigma$  d'à peine 2 dB, on peut escompter avec  $N = 40$  un écart type de la valeur moyenne  $\sigma_m = \sigma / \sqrt{N-1} \approx 0.3$  dB.

Le mesurage SPB visant à déterminer l'influence du revêtement à un emplacement spécifique doit remplir les conditions suivantes :

**Géométrie** Le positionnement du microphone correspond à la disposition de référence, à une distance de 7.5 m du milieu de la voie de circulation et une hauteur de 1.2 m au-dessus de la chaussée.

**Revêtement** La surface adjacente à la voie de circulation concernée dans la direction du microphone doit être horizontale et aussi dure que possible d'un point de vue acoustique, afin d'assurer des conditions de propagation homogènes (voir à ce sujet l'annexe de la version intégrale du rapport final). Cette surface dure peut aussi être fournie par une voie adjacente. Sur les autoroutes, il s'agit généralement de la bande d'arrêt d'urgence, sur les routes à deux voies, cette condition peut être remplie par la voie la plus éloignée du microphone.

**Environnement** L'environnement doit être dépourvu d'objets réfléchissants afin de ne pas ajouter des réflexions supplémentaires au signal du microphone.

**Choix des véhicules** Le jeu d'événements à évaluer est constitué en fonction la catégorie de véhicules dominante. C'est généralement la catégorie des VT (catégorie SWISS 10 3). Dans la situation d'exploitation des véhicules examinée, le bruit de roulement doit être dominant par rapport au bruit de propulsion.

**Zone de vitesse** L'évaluation prend en compte les véhicules dont la vitesse se situe dans une zone allant jusqu'à  $\pm 15$  % de la vitesse moyenne de conduite.

**Événements valables** Les passages sont considérés comme valables (c'est-à-dire non perturbés) lorsqu'ils se produisent de manière isolée. Au moment du passage devant le microphone, la distance à tout véhicule non souhaitable se trouvant à proximité doit être d'au moins 100 m. Les véhicules qui ne remplissent pas ce critère sont exclus de l'évaluation. Les véhicules qui se suivent de manière plus rapprochée peuvent être évalués en tant que groupe si tous les véhicules appartiennent à la même catégorie et circulent à des vitesses comparables.

## 15.2 Documentation

La documentation d'un mesurage SPB (voir également la section 13 dans ISO 11819-1) doit d'une part comporter les énergies événementielles spectrales  $L_{E,M}[k,i]$  (avec  $k$  : indice de mesure et  $i$  : indice de bande de tiers d'octave) et d'autre part fournir toutes les informations nécessaires pour un calcul de l'énergie événementielle (excepté la propriété du revêtement) :

- Catégorie SWISS 10 et vitesse des passages pris en compte
- Température de l'air
- Déclivité de la route

## 15.3 Analyse

La détermination de l'influence locale du revêtement doit permettre au modèle de reproduire avec exactitude la somme des énergies événementielles mesurées. À partir de  $N$  événements mesurés, on calcule le niveau mesuré spectral total de l'énergie événementielle  $L_{E,M,tot}[i]$  :

$$L_{E,M,tot}[i] = 10 \lg \left( \sum_{k=1}^N 10^{0.1 L_{E,M}[k,i]} \right) \quad (15.1)$$

Le spectre du terme de correction  $\Delta L_{W,R,road}[i]$  est ensuite adapté de telle sorte que le pronostic effectué par sonROAD18 pour le niveau d'énergie événementielle total  $L_{E,R,tot}[i]$  soit conforme au niveau mesuré  $L_{E,M,tot}[i]$ . Pour le jeu des événements de passage pris en compte,  $L_{E,R,tot}[i]$  est calculé avec l'éq. 15.2.

$$L_{E,R,tot}[i] = 10 \lg \left( \sum_{k=1}^N 10^{0.1 (L_W[k,c,i] - 10 \lg(v[k]) - 6.1 + A'_{atm}[i])} \right) \quad (15.2)$$

Où  $L_W[k, c, i]$  représente la puissance acoustique émise au total par un véhicule  $k$  de la catégorie  $c$  dans le tiers d'octave  $i$  l'éq. 10.1,  $v[k]$  correspond à la vitesse du véhicule  $k$  en km/h et  $A'_{atm}[i]$  est le terme spectral de l'atténuation due à l'air pour 7.5 m selon l'annexe de la version intégrale du rapport final.

# 16 Caractérisation du revêtement par mesurages SEM

## 16.1 Concept

Les mesurages SEM collectent et décrivent les immissions à un point récepteur (microphone) proche de la route sous la forme de niveaux de pression équivalents des tiers d'octave d'un événement sonore. La situation de mesurage est reproduite avec sonROAD18 et une correction du revêtement de manière à éliminer les différences entre le mesurage et le calcul. Cette procédure est comparable à la calibration d'un modèle. Les emplacements les plus appropriés sont des tronçons ouverts non influencés par des réflexions où un flux de véhicules homogène circule à des vitesses où domine le bruit de roulement.

Les temps nécessaires à la pondération des mesurages SEM prennent en compte le flux de trafic. Il faut veiller à niveler les particularités individuelles des véhicules, ce qui implique que le mesurage porte sur au moins 200 véhicules et que ceux-ci circulent à des vitesses spécifiques.

## 16.2 Documentation

La documentation d'un mesurage SEM doit d'une part comporter le spectre de niveau de bande de tiers d'octave équivalent en énergie d'un son permanent  $L_{eq,M,tot}[i]$  tel qu'enregistré par un microphone, et d'autre part mettre à disposition toutes les informations nécessaires pour calculer le niveau d'immission (mis à part les propriétés du revêtement) :

- Géométrie du mesurage comprenant la hauteur des microphones et leur distance à toutes les voies de circulation
- Propriétés du sol
- Emplacement, direction et étendue des éventuelles surfaces réfléchissantes
- Volumes de trafic horaires ventilés par voies de circulation selon les catégories SWISS 10
- Vitesses moyennes ventilées par voies de circulation selon les catégories SWISS 10
- Température de l'air
- Durée du mesurage
- Déclivité de la route
- Caractérisation du flux de véhicules

## 16.3 Évaluation

Pour l'évaluation, la situation de mesurage est reproduite avec sonROAD18 en présupposant un revêtement de référence. On fait disparaître l'écart apparaissant entre le mesurage et le calcul dans chaque tiers d'octave en adaptant l'influence du revêtement  $\Delta L_{W,R,road}[i]$ .

Dans une situation ouverte comprenant un sol dur sans autres éléments réfléchissants, le niveau d'immission modélisé  $L_{eq,R,tot}[i]$  peut être estimé dans le tiers d'octave  $i$  comme la superposition des contributions de toutes les voies selon l'éq. 16.1. On admet qu'aux distances concernées, l'effet de sol peut être assimilé à celui de la distance de référence de 7.5 m.

$$L_{eq,R,tot}[i] = 10 \lg \left( \sum_{s=1}^S \frac{1}{d[s]} \cdot 10^{0.1A'_{atm}[s,i]} \sum_{c=1}^{10} \frac{N[s,c]}{v[s,c]} \cdot 10^{0.1L_W[c,i]} \right) - 33.0 \quad (16.1)$$



Dans l'éq. 16.1,  $S$  désigne le nombre de voies,  $d[s]$  la plus courte distance du microphone à la voie avec l'indice  $s$  et  $A'_{\text{atm}}[s, i]$  correspond à l'atténuation due à l'air en tiers d'octave pour la totalité du passage sur la voie  $s$ .  $N[s, c]$  et  $v[s, c]$  sont respectivement les volumes de trafic horaires et les vitesses moyennes de la catégorie de véhicules  $c$  sur la voie  $s$ .  $L_W[c, i]$  est la puissance acoustique totale émise par un véhicule de catégorie  $c$  dans le tiers d'octave  $i$  selon l'éq. 10.1. Le terme d'atténuation due à l'air  $A'_{\text{atm}}[s, i]$  peut être estimé au moyen des indications figurant dans l'annexe de la version intégrale du rapport final.

# 17 Caractérisation du revêtement par mesurages CPX

Pour estimer la correction du revêtement  $\Delta L_{W,R,road}[i]$  valable à un emplacement donné, le mesurage CPX constitue une alternative aux méthodes SPB et SEM. La procédure CPX est très rapide et permet une saisie efficace des profils longitudinaux, mais elle exige une conversion du niveau mesuré par CPX en énergies événementielles sur les bords de la route. Cette transformation génère une certaine incertitude, car avec CPX, on part d'un ou deux fichiers de données qu'on extrapole à l'ensemble du parc de véhicules et de pneus en circulation, et la fonction permettant de transposer la position du microphone de champ proche de la méthode CPX à la position en bordure de la route n'est pas strictement indépendante du revêtement. Pour définir un modèle de conversion des valeurs mesurées par CPX en spectres de correction du revêtement, il faut disposer pour un même emplacement de paires de données représentant les valeurs spectrales CPX et les énergies événementielles spectrales à 7.5 m / 1.2 m. À partir des mesurages de l'énergie des événements sonores, il est ensuite possible de déterminer les valeurs de correction du revêtement  $\Delta L_{W,R,road}[i]$  ] comme indiqué au chapitre 15 pour constituer finalement une relation fonctionnelle  $f_{CPX \rightarrow Belagskorrektur}[i]$ .

## **18 Mesurage des nouveaux types de véhicules**

Recommandations pour la planification et la mise en oeuvre de mesurages d'émissions ciblés en vue de la détermination des paramètres de modèle pour les types et catégories de véhicules spéciaux. Pour un exposé détaillé, se reporter à la version intégrale du rapport final sur sonROAD18.

## **19 Interface avec des modèles de propagation**

Exigences à remplir pour la prise en compte des réflexions par le sol à proximité de la source lors de l'interfaçage du modèle d'émission sonROAD18 avec des modèles de propagation tels que ISO 9613-2 ou sonX. Pour un exposé détaillé, se reporter à la version intégrale du rapport final sur sonROAD18.

## 20 Comparaison avec StL-86+

La comparaison avec StL-86+ se base sur le niveau équivalent  $L_{eq,A}$  pronostiqué à 1 m de distance. Cette grandeur correspond directement à la valeur d'émission de StL-86+. Dans sonROAD18, on a d'abord défini un niveau de puissance acoustique pondéré A  $L_{W,A}[c]$  à partir du niveau de tiers d'octave et en tenant compte de la pondération A puis déterminé un  $L_{eq,A}$  selon la dérivation de l'éq. 10.20.

$$L_{eq,A} = 10 \lg \left( \sum_{c=1}^{10} \frac{N[c]}{v[c]} \cdot 10^{0.1 L_{W,A}[c]} \right) - 33.0 \quad (20.1)$$

La comparaison ne porte que sur les émissions. Les éventuels écarts dans le calcul de la propagation ne sont pas traités ici.

### 20.1 Relation à la vitesse des émissions des voitures de tourisme

La figure 20.1 montre la relation à la vitesse des valeurs d'émission pour les voitures de tourisme (1 VT/h) sur un revêtement ACMR8 et aux conditions de référence. Tant dans sonROAD18 que dans StL-86+, on a admis que la correction du revêtement = 0. Dans sonROAD18, la relation à la vitesse présente généralement une pente abrupte. Pour les faibles vitesses, sonROAD18 prédit des émissions plus basses que StL-86+, pour les vitesses élevées, des émissions plus élevées. À  $v = 50$  km/h, sonROAD18 calcule un niveau d'émission de 46.5 dB(A), c'est-à-dire 0.5 dB(A) de plus que StL-86+, qui calcule 46.0 dB(A).

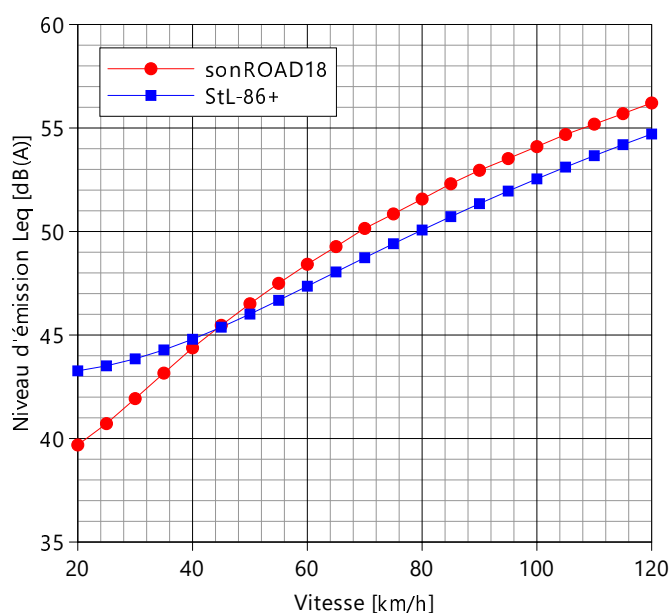


FIGURE 20.1 – Niveau d'émission  $L_{eq,A}$  pronostiqué par sonROAD18 et StL-86+ rapporté à la vitesse sur un revêtement de référence à une distance de 1 m pour 1 VT/h.

### 20.2 Calcul des scénarios

Pour effectuer une comparaison avec des compositions de trafic réalistes, on s'appuie sur quatre scénarios conçus à partir du fichier de données du convertisseur SWISS 10. Sont traités en tant que résultats de la

modélisation les niveaux équivalents  $L_{eq,A}$  à une distance de 1 m. Les calculs supposent à chaque fois les conditions de référence suivantes :

- Route avec revêtement de référence
- Température : 10°C
- Conduite constante

Les vitesses introduites dans les calculs de sonROAD18 et dans ceux de StL-86+ sont toujours les vitesses signalisées.

### 20.2.1 Route collectrice horizontale avec vitesse signalisée de 30 km/h : RC-30

Le calcul avec sonROAD18 se base sur les chiffres du trafic et les vitesses indiqués au tableau 20.1 (RS-30 nuit selon le convertisseur SWISS 10), le calcul avec StL-86+ sur ceux du tableau 20.2. Le tableau 20.7 présente les résultats. L'émission calculée avec sonROAD18 est inférieure de 3.3 dB(A) à celle calculée avec StL-86+. Cela reflète l'observation faite plus haut selon laquelle StL-86+ surestime les émissions aux faibles vitesses. Ce scénario montre que le phénomène est accentué par une proportion relativement élevée de camions.

N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	v1	v2	v3	v4	v5	v6	v7	v8	v9	v10
0	49	875	0	20	0	0	23	33	0	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30

TABLE 20.1 – Volumes de trafic horaires  $N$  et vitesses  $v$  en fonction des catégories SWISS 10 tels que présumés dans le calcul de sonROAD18.

Véh/h	Proportion de camions	Vitesse
1000	0.10	30

TABLE 20.2 – Volume de trafic horaire, proportion de camion et vitesse tels que présumés dans le calcul de StL-86+.

### 20.2.2 Route de liaison horizontale avec vitesse signalisée de 50 km/h : RL-50

Le calcul avec sonROAD18 se base sur les chiffres du trafic et les vitesses indiqués au tableau 20.3 (RL-50 nuit selon le convertisseur SWISS 10), le calcul avec StL-86+ sur ceux du tableau 20.4. Le tableau 20.7 présente les résultats. L'émission calculée avec sonROAD18 est inférieure de 0.7 dB(A) à celle calculée avec StL-86+.

N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	v1	v2	v3	v4	v5	v6	v7	v8	v9	v10
10	20	900	2	44	2	1	9	8	3	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50

TABLE 20.3 – Volumes de trafic horaires  $N$  et vitesses  $v$  en fonction des catégories SWISS 10 tels que présumés dans le calcul de sonROAD18.

Véh/h	Proportion de camions	Vitesse
1000	0.05	50

TABLE 20.4 – Volume de trafic horaire, proportion de camion et vitesse tels que présumés dans le calcul de StL-86+.

### 20.2.3 Routes de liaison avec une pente de 5 % et une vitesse signalisée de 50 km/h : RL-50

Le calcul avec sonROAD18 se base sur les chiffres du trafic (RL-50 nuit selon le convertisseur SWISS 10) et les vitesses indiqués au tableau 20.3. Pour prendre en compte la pente de 5 %, le trafic est divisé un deux

flux égaux, l'un montant, l'autre descendant. Le calcul avec StL-86+ se base sur ceux du tableau 20.4, une correction de la pente de  $0.5 \cdot (5 - 3) = 1$  dB étant appliquée à l'ensemble du trafic. Le tableau 20.7 présente les résultats. Dans sonROAD18, l'émission est inférieure de 1.5 dB(A) à celle que calcule StL-86+. La différence entre les deux modèles est plus importante pour des tronçons en pente que pour des tronçons horizontaux, car StL-86+ prend en compte une correction plus importante de la pente.

#### 20.2.4 Route horizontale à grand débit avec vitesse signalisée de 120 km/h : RGD-4-N-120

Le calcul avec sonROAD18 se base sur les chiffres du trafic (RGD-4-N-120 nuit selon le convertisseur SWISS 10) et les vitesses indiqués au tableau 20.5. Le calcul avec StL-86+ se base sur ceux du tableau 20.6. Le tableau 20.7 présente les résultats. L'émission calculée par sonROAD18 est supérieure de 0.9 dB(A) à celle que calcule StL-86+.

N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	v1	v2	v3	v4	v5	v6	v7	v8	v9	v10
5	7	821	5	95	5	3	16	19	23	100	120	120	80	120	80	80	80	80	80

TABLE 20.5 – Volumes de trafic horaires  $N$  et vitesses  $v$  en fonction des catégories SWISS 10 tels que présumés dans la modélisation avec sonROAD18.

Véh/h	Proportion de camions	Vitesse
1000	0.05	120

TABLE 20.6 – Volume de trafic horaire, proportion de camions et vitesse présumés dans la modélisation avec StL-86+.

#### 20.2.5 Synthèse des résultats

Le tableau 20.7 donne une vue d'ensemble des résultats obtenus ci-dessus.

scénario	sonROAD18	StL-86+	sonROAD18 - StL-86+
RC-30, horizontale	74.8	78.1	-3.3
RL-50, horizontale	77.5	78.2	-0.7
RL-50, pente 5 %	77.8	79.2	-1.5
RGD-4-N-120, horizontale	86.7	85.8	+0.9

TABLE 20.7 – Résultats de la comparaison entre les modélisations effectuées par sonROAD18 et StL-86+ en dB(A). Les niveaux sont exprimés en  $L_{eq,A}$  à 1 m de distance.

# 21 Estimation du niveau maximum pondéré A du passage

## 21.1 Contexte

Pour caractériser les émissions, sonROAD18 utilise la puissance acoustique rayonnée  $L_W$  à partir d'une source ponctuelle omnidirectionnelle de substitution qui, en tant que grandeur cible, produit la quantité correcte d'énergie de l'événement sonore lors d'un passage. De cette manière, le niveau équivalent est correctement reproduit en tant que grandeur de base significative pour l'OPB. Selon la vitesse et la catégorie de véhicule, la caractéristique directionnelle horizontale nivelée avec cette stratégie peut toutefois conduire à une surestimation systématique du niveau maximum d'un passage. Dans ce cas, on dérive des mesurages un terme de correction  $\Delta K_{\max}$  rendant possible l'estimation du niveau maximum à partir du niveau de puissance acoustique. Pour trouver le niveau maximum pondéré A  $L_{\max,7.5m,A}$  réel à une distance de référence  $d = 7.5$  m, on pose :

$$L_{\max,7.5m,A} = L_{W,A} - 20 \log(d) - 8 + \Delta K_{\max} = L_{W,A} - 25.5 + \Delta K_{\max} \quad (21.1)$$

Où  $L_{W,A}$  correspond au niveau de puissance acoustique pondéré A.

## 21.2 Analyse des données

Comme l'a montré l'évaluation des données SMA-E brièvement évoquée précédemment (chapitre 4), les estimations du niveau maximum sans correction pour les vitesses des véhicules des catégories SWISS 10 3 à 6 (VT et voitures de livraison) sur les autoroutes se situent aux environs de 1 à 2 dB(A). Les autres analyses de la catégorie des VT s'appuient sur des données propres ou sur des données trouvées dans la littérature. Le tableau 21.1 et la figure 21.1 1 établissent la liste des campagnes de mesure prises en compte et montrent les corrections obtenues en conséquence  $\Delta K_{\max}$ .

Emplacement	Vitesse	Pente [%]	Revêtement	$\Delta K_{\max}$
Camignolo	120	0	SDA8	-1.6
Moleno	120	0	SDA8	-1.3
Reiden	120	0	SMA11	-2.1
Rothenbrunnen	100	0	SDA8	-1.5
Magden	80	0	AC11	-0.6
Rümikon	80	0	ACMR8	-1.2
Frenkendorf	60	0	Beton	-2.0
Amsteg	60	0	ACMR11	-1.0
Michelstrasse	30	9		0.5
Kuerbergstrasse	30	14		0.2
Langensteinstrasse	30	7		0.9
Zofingen G+P [30]	50	0	SDA4b	-0.2
Zofingen G+P [30]	30	0	SDA4b	-0.2
Kappel G+P [30]	50	0	ACMR8	-0.1
Kappel G+P [30]	30	0	ACMR8	0.5

TABLE 21.1 – Campagne de mesure pour la détermination de la correction  $\Delta K_{\max}$ .

La correction  $\Delta K_{\max}$  montre une relation à la vitesse qui peut être estimée pour les voitures de tourisme et les voitures de livraison (catégories SWISS 10 3...6) au moyen de l'éq. 21.2.

$$\Delta K_{\max} = 0.9 - 0.0227 \cdot v \quad [\text{dB(A)}], \quad v \geq 20 \text{ km/h} \quad (21.2)$$

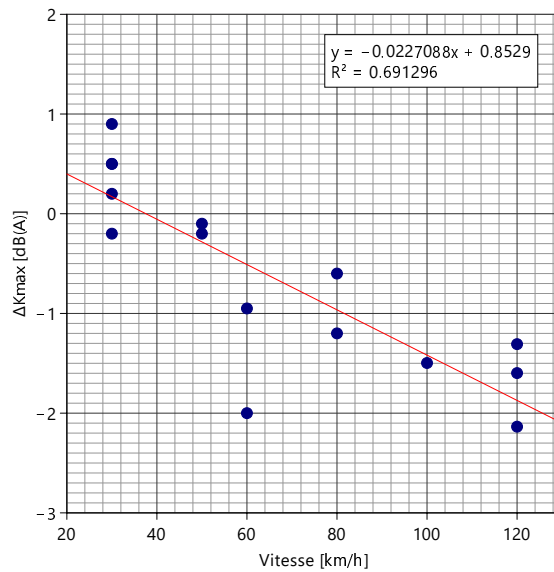


FIGURE 21.1 – Corrections du niveau maximum  $\Delta K_{\max}$  en fonction de la vitesse obtenue à partir des données de mesurages et courbe de tendance linéaire.

Pour les basses vitesses ou les catégories de véhicules SWISS 10 1, 2, 7...10, les données sont à interpréter comme  $\Delta K_{\max} = 0$ . Ce comportement indique une corrélation avec la prédominance du bruit des pneus. C'est pourquoi la littérature de référence [10] propose une caractéristique horizontale non-ronde du bruit des pneus pour figurer cet effet. Une comparaison quantitative de la relation à la vitesse de  $\Delta K_{\max}$  et de la contribution relative du bruit des pneus au bruit total montre toutefois qu'une caractéristique directionnelle indépendante de la vitesse et appliquée exclusivement au bruit des pneus n'est pas en mesure de modéliser les valeurs du tableau 21.1 et de la figure 21.1.



# Bibliographie

- [1] Ordonnance sur la protection contre le bruit (OPB) du 15 décembre 1986 (état au 1er janvier 2016).
- [2] Modèle du calcul du bruit du trafic routier par ordinateur, Empa Dübendorf, Cahier de l'Environnement n° 60, Office fédéral de la protection de l'environnement, 1987 ; ainsi que Mitteilungen zur Lärmschutzverordnung (LSV) n° 6, Office fédéral de l'environnement, de la forêt et du paysage OFEFP, 1995.
- [3] Heutschi K : : SonRoad - Modèle pour le calcul du bruit routier, Cahiers de l'Environnement n° 366, Office fédéral de l'environnement, de la forêt et du paysage OFEFP, Berne, 2004.
- [4] Directive EU 2015/996 de la Commission du 19 mai 2015 établissant des méthodes communes d'évaluation du bruit conformément à la directive 2002/49/CE du Parlement européen et du Conseil.
- [5] Directive n° 13012 " Postes de comptage du trafic ", Office fédéral des routes OFROU, 2009.
- [6] S. J. Shilton, F. Anfosso Ledee, H. van Leeuwen, Conversion of existing road source data to use CNOSSOS-EU, 469-474, EuroNoise 2015.
- [7] J. T. Broch, Principles of experimental frequency analysis, Elsevier Science Publishers, 1990.
- [8] K. Heutschi, SonRoad : New Swiss Road Traffic Noise Model, Acta Acustica united with Acustica, vol. 90, 548-554, 2004.
- [9] K. Heutschi, On single event measurements of heavy road vehicles in freely flowing traffic, Acta Acustica united with Acustica, vol. 94, 709-714, 2008.
- [10] H.G. Jonasson, Acoustical Source Modelling of Road Vehicles, Acta Acustica united with Acustica, vol. 93, 173-184, 2007.
- [11] T. Ziegler, E. Bühlmann, S. Egger, E. Hammer, Grolimund + Partner AG, Grundlagen zur Beurteilung der Lärmwirkung von Tempo 30, Forschungsprojekt VSS 2012/214, 2017.
- [12] A. Bernasconi, N. Notari, Bestimmung des Alterungsverhaltens der Beläge nach SPB an den MFM-U Standorten unter Berücksichtigung der vor Ort bestimmten Temperaturkoeffizienten, IFEC Dokument 160755 B 05, 2016.
- [13] [www.COMPETT.org](http://www.COMPETT.org)
- [14] L. M. Iversen, G. Marbjerg, H. Bendtsen, Noise from electric vehicles - 'state-of-the-art' literature survey, Internoise, 2013.
- [15] R. S. H. Skov, L. M. Iversen, Noise from electric vehicles - measurements, COMPETT WP3, 25.03.2015.
- [16] <http://forever.fehrl.org>
- [17] M. A. Pallas, M. Bérengier, J. Kennedy, P. Morgan, S. Gasparoni, R. Wehr, Noise emission levels for electric and hybrid vehicles - First results of the FOREVER project, Proc. Transport Research Arena 2014 (TRA2014).
- [18] M. A. Pallas, M. Bérengier, M. Muirhead, P. Morgan, How to consider Electric and Hybrid Electric vehicles in CNOSSOS-EU predicting method ?, Proceedings of Forum Acusticum, 2014.
- [19] M. A. Pallas, M. Bérengier, R. Chatagnon, M. Czuka, M. Conter, M. Muirhead, Towards a model for electric vehicle noise emission in the European prediction method CNOSSOS-EU, Applied Acoustics 113, 89 - 101, 2016.

- [20] J. W. Biermann, S. Ruschmeyer, Sustainable noise reduction and enhanced passenger comfort using hybrid diesel-electric urban buses, *Internoise*, 2012.
- [21] M. A. Pallas, R. Chatagnon, J. Lelong, Noise emission and noise sources of a hybrid bus, *Internoise*, 2013.
- [22] M. A. Pallas, R. Chatagnon, J. Lelong, Noise emission assessment of a hybrid electric mid-size truck, *Applied Acoustics*, 2013.
- [23] S. Gasparoni, M. Czuka, R. Wehr, M. Conter, M. A. Pallas, M. Bérengier, FOREVER Impact of low-noise tyres on electric vehicle noise emission, WP3 Final Report, 2015.
- [24] M. Czuka, M. A. Pallas, P. Morgan, M. Conter, Impact of potential and dedicated tyres of electric vehicles on the tyre-road noise and connection to the EU noise label, *Proceedings of 6th Transport Research Arena*, 2016.
- [25] J. Kragh, J. Oddershede, NordTyre - Car tyre labelling and Nordic traffic noise, *Internoise*, 2013.
- [26] B. Swieczko-Zurek, J. Ejsmont, G. Ronowski, How efficient is noise labeling of tires ?, *ICSV 21*, 2014.
- [27] UN (ECE) Regulation No. 117 Rev. 3, Uniform provisions concerning the approval of tyres with regard to rolling sound emissions and/or to adhesion on wet surfaces and/or to rolling resistance, 2014.
- [28] Ermittlung der durch Motorräder verursachten akustischen Immissionen im Nationalpark, *Empa Untersuchungsbericht Nr. 455'585*, 2010.
- [29] ISO/FDIS 11819-2 :2016(E), Acoustics - Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise - Part 2 : The close-proximity method.
- [30] C. Ammann, K. Heutschi, S. Rüttener, Potenzial von Temporeduktionen innerorts als Lärmschutzmassnahme, *Zeitschrift für Lärmbekämpfung*, vol. 11, 43-49, 2016.
- [31] S. Egger, SONROAD18 - BELAGSDATEN GROLIMUND + PARTNER AG DOKUMENTATION VERFÜGBARER DATEN, 30. Mai 2017.
- [32] Hartmann & Sauter, Verkehrsdaten Stadt Chur 2016, Gesamtbericht im Auftrag des Amts für Natur und Umwelt Kanton Graubünden, 2017.
- [33] J.M. Wunderli, R. Pieren, M. Habermacher, D. Vienneau, C. Cajochen, N. Probst-Hensch, M. Rösli, M. Brink, Intermittency Ratio - A metric reflecting short-term temporal variations of transportation noise exposure, *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 1-11, 2015.
- [34] F. Lange, Anfahrbeschleunigungen, *VRR VerkehrsRechtsReport*, vol. 10, 377-382, 2006.
- [35] ifec : Vergleich der Lärmemissionen von Winter- und Sommerpneus an den MfM-U Messstandorten : Kurzbericht, im Auftrag des BAFU, 2017.
- [36] ISO/IEC. Uncertainty of measurement - Part 3 : Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM :1995). Guide 98-3. Geneva, Switzerland : International Organisation for Standardization (ISO) and International Electrotechnical Commission (IEC) ; 2008.
- [37] A. Bernasconi, N. Notari, D. Bozzolo, Untersuchung der akustischen Alterung von Belägen nach SPB-Verfahren unter Berücksichtigung der vor Ort bestimmten Temperatur- und Geschwindigkeitskoeffizienten, *DAGA 2017*, 125-128.
- [38] Basler & Hofmann AG, Lärmmessungen T30 Stadt Zürich, Protokoll Langzeitmessung, 10.01.2014.
- [39] T. Boss, Grolimund & Partner AG, T30-Versuch Kalchbühlstrasse, Stadt Zürich, Akustische Begleitmessungen, im Auftrag des Umwelt- und Gesundheitsschutz Zürich UGZ, A3267, 16. Oktober 2009, ergänzt 16. November 2010.
- [40] Ch. Ammann, Grolimund & Partner AG, Potential von Temporeduktionen innerorts als Lärmschutzmassnahme, Studie im Auftrag der Stadt Zürich und Kanton Aargau, A4398, 16.01.2015.

# A Liste des annexes au rapport final

La version intégrale du rapport final contient les annexes suivantes :

- Longueur des véhicules en fonction des catégories
- Ensemble des évaluations SMA-E
- Évaluations de la possibilité de combiner l'effet des pneus et l'effet du revêtement
- Évaluations au sujet de la vitesse de conduite
- Paramètre de Weibull pour la caractérisation des distances entre deux véhicules
- Exemples de calcul : résultats
- Propagation du son dans la géométrie de référence sur des sols durs et mous
- Relation entre la moyenne arithmétique et énergétique
- Atténuation par l'air spectrale
- Indications sur les corrections pour les accélérations (carrefours et giratoires)
- Déclaration de conformité