



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC  
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

**Bundesamt für Strassen**  
**Office fédéral des routes**  
**Ufficio federale delle Strade**

# **Bases d'évaluation de l'effet d'une vitesse de 30 km/h sur le bruit**

**Grundlagen zur Beurteilung der Lärmwirkung von Tempo  
30 (Originalsprache Deutsch)**

**Basic information for assessing noise effects at speed limit  
30 km/h**

**Grolimund + Partner AG**  
**Erik Bühlmann, MSc en géographie, Dipl. Acousticien SSA**  
**Sebastian Egger, MSc Climate Science**  
**Emanuel Hammer, Dr. sc. EPF**  
**Toni Ziegler, Dipl. sc. EPF**

**Projet de recherche VSS 2012/214 sur demande de l'Association suisse  
des professionnels de la route et des transports (VSS)**

**Octobre 2018**

**1600F**

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)

# **Bases d'évaluation de l'effet d'une vitesse de 30 km/h sur le bruit**

**Grundlagen zur Beurteilung der Lärmwirkung von Tempo 30  
(Originalsprache Deutsch)**

**Basic information for assessing noise effects at speed limit 30  
km/h**

**Grolimund + Partner AG  
Erik Bühlmann, MSc en géographie, Dipl. Acousticien SSA  
Sebastian Egger, MSc Climate Science  
Emanuel Hammer, Dr. sc. EPF  
Toni Ziegler, Dipl. sc. EPF**

**Projet de recherche VSS 2012/214 sur demande de l'Association suisse des  
professionnels de la route et des transports (VSS)**

**Octobre 2018**

**1600F**

## Impressum

### **Centre de recherche et équipe de projet**

#### **Direction du projet**

Toni Ziegler

#### **Membres**

Erik Bühlmann

Sebastian Egger

Dr. Emanuel Hammer

### **Commission d'experts responsable**

Commission d'experts 2 : conception

### **Groupe d'accompagnement**

#### **Président**

Thomas Stern, Direction des travaux publics, des transports et de l'énergie, Canton de Berne

#### **Membres**

Markus Weber, Basler & Hofmann AG

Dr. Kurt Heutschi, EMPA

Maria Balmer, OFROU I/FU

Stefanie Rüttener, Ville de Zurich, Protection de l'environnement et de la santé, Protection contre le bruit

Didier Racine, Service de l'énergie et de l'environnement, Canton de Neuchâtel

Michael Gerber, OFEV, Division Bruit et RNI

Ursula Waber, Ville de Berne, Office de la protection de l'environnement

Martin Stauber, BBS Ingenieure AG

### **Cofinancement du projet de recherche**

Office fédéral de l'environnement OFEV

### **Traduction**

Office fédéral de l'environnement OFEV (Juillet 2018)

### **Requérant**

Office fédéral des routes OFROU

### **Commande**

Le document peut être téléchargé gratuitement à l'adresse <http://www.mobilityplatform.ch/fr/>.



# Table des matières

<b>Impressum</b> .....	<b>4</b>
<b>Résumé</b> .....	<b>7</b>
<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>9</b>
<b>Summary</b> .....	<b>11</b>
<b>1 Introduction</b> .....	<b>13</b>
1.1 Préambule et problématique .....	13
1.2 Contexte de la recherche .....	14
1.3 Comparaison entre les modèles existants .....	14
1.4 Besoins en matière de recherche .....	15
1.4.1 La vitesse comme paramètre d'influence .....	15
1.4.2 L'influence du comportement de conduite .....	16
1.4.3 Évolution de la flotte des véhicules et des pneus .....	16
1.4.4 L'influence des mesures de construction .....	16
1.4.5 L'influence des mesures d'aménagement .....	16
1.4.6 L'influence du revêtement routier .....	17
1.5 Buts du travail de recherche .....	17
<b>2 Méthodes</b> .....	<b>19</b>
2.1 Concept d'enquête .....	19
2.2 Collecte de données pour l'élaboration de la formule d'émission dans le domaine des basses vitesses .....	20
2.2.1 Concept de mesurages .....	20
2.2.2 Flotte de véhicules .....	21
2.2.3 Procédure de mesurage .....	22
2.2.4 Évaluation sommaire des différents types de pneus .....	27
2.3 Collecte de données sur le comportement de conduite statistique .....	28
2.3.1 Concept de mesurage .....	28
2.3.2 Procédure de mesurage .....	29
2.3.3 Déroulement des mesurages .....	30
2.4 Détermination de la formule d'émission pour conduite constante .....	31
2.4.1 Bruit de roulement .....	31
2.4.2 Bruit de propulsion .....	33
2.5 Détermination de la formule d'émission pour la conduite en phase d'accélération .....	36
2.6 Détermination des formules sources .....	37
2.6.1 Représentation du comportement de conduite .....	38
2.6.2 Prise en compte de l'influence du revêtement, fusion dans la formule d'émission & conversion en $Leq$ .....	38
2.6.3 Pondération de la flotte des voitures de tourisme .....	41
2.7 Mise en œuvre de la validation .....	42
<b>3 Résultats</b> .....	<b>43</b>
3.1 Formules d'émission .....	43
3.1.1 Bruit de roulement .....	43
3.1.2 Bruit de propulsion .....	44
3.1.3 Accélération .....	45
3.2 Statistique sur le comportement de conduite .....	46
3.2.1 Distribution de la vitesse .....	46
3.2.2 Mode de conduite .....	47
3.2.3 Relation vitesse-rapport de vitesse .....	48
3.2.4 Style d'accélération .....	49
3.3 Formules sources .....	51
3.3.1 Validation grossière des formules sources .....	51
3.3.2 Comparaison avec le modèle d'émissions suisse StL86+ à une vitesse de 50 km/h .....	52

3.3.3	Influence des vitesses.....	53
3.3.4	Influence de la proportion de camions.....	55
3.3.5	Influence du revêtement routier .....	57
3.4	Points limitants .....	59
<b>4</b>	<b>Conclusions .....</b>	<b>61</b>
<b>5</b>	<b>Exemple d'estimation d'effet acoustique dans la pratique .....</b>	<b>65</b>
	<b>Annexes .....</b>	<b>67</b>
	<b>Glossaire.....</b>	<b>95</b>
	<b>Symboles et abréviations.....</b>	<b>97</b>
	<b>Bibliographie .....</b>	<b>99</b>
	<b>Rapport de fin de projet .....</b>	<b>103</b>
	<b>Liste des rapports de recherche dans le domaine de la circulation routière .....</b>	<b>107</b>

## Résumé

Dans les zones à forte densité urbaine, la pose de revêtements phono-absorbants et la réduction de la limite de vitesse sont souvent les seules mesures de réduction du bruit à la source possibles selon l'Ordonnance sur la protection contre le bruit (OPB). Dans les projets d'assainissement du bruit routier en milieu urbain, la mise en place de zones 30 est ainsi privilégiée. Or, les modèles d'émission de bruit disponibles actuellement en Suisse ne sont pas conçus pour les secteurs à faibles vitesses et ne tiennent pas compte des particularités liées aux zones 30. Il manque aujourd'hui une base de données fiable permettant de définir l'impact des mesures de réduction de trafic ou l'impact des zones 30.

Dans le cadre du projet de recherche VSS 2012/214, une base de données actuelle a été créée afin d'évaluer les nuisances sonores dans les zones 30. L'objectif est de garantir la fiabilité des pronostics de réduction du bruit dans les zones à faible vitesse, en particulier dans les zones 30. Pour cela, une campagne de mesures a été réalisée sur une flotte de véhicules actuelle et représentative de la Suisse. Les émissions sonores liées à plusieurs types de comportements (changements de vitesse, conduite irrégulière, style de conduite, etc.) ont été collectées. Des algorithmes en ont été déduits pour deux modes de conduite: conduite à vitesse constante et conduite avec accélération. A l'aide d'analyses statistiques sur les modes de conduite dans des zones 30 existantes et de l'adaptation des données d'émission pour les poids lourds issues du modèle d'émission européen CNOSSOS, ces algorithmes d'émission ont permis d'obtenir des valeurs sources, et donc une évaluation fiable des nuisances sonores dans les zones 30. Les résultats montrent que des réductions de bruit notables sont possibles grâce aux zones 30. En fonction de la vitesse effective, du taux de poids lourds et du type de revêtement, les émissions sonores (Leq) dans les zones 30 sont réduites d'environ 2 dB à 4.5 dB. La prise en compte d'une flotte de véhicules actuelle et du type de conduite joue un rôle principal dans cette étude. On constate une corrélation entre la réduction du bruit et le type de zone à vitesse réduite. En effet, les exemples montrent que même sans mesures constructives importantes, si un trafic régulier est maintenu, il est possible d'obtenir des réductions de vitesse considérables et d'aboutir ainsi à une réduction notable des émissions de bruit.

D'après les pronostics de réduction du bruit pour les différents types de zones 30, les paramètres clés influençant les émissions sonores sont la vitesse effective, le taux de poids lourds et la qualité acoustique du revêtement en place. La réduction de vitesse (soit la différence des vitesses effectives avant et après mise en place de la zone 30) est déterminante pour l'efficacité acoustique d'une zone 30. Dans la plupart des cas, une réduction de 10km/h suffit pour réduire notablement le bruit, pour autant que la réduction du trafic obtenue n'entraîne pas une conduite irrégulière ni l'utilisation de petites vitesses. L'effet acoustique des zones 30 s'amointrit cependant à mesure que le taux de poids lourds augmente. Pour un taux de poids lourds de plus de 15%, une limitation de la vitesse à 30km/h ne produira qu'une faible réduction des nuisances sonores. De plus, la qualité acoustique du revêtement a un impact fort sur l'effet acoustique des zones 30. En effet, plus le revêtement est bruyant, c'est-à-dire que sa contribution aux bruits de roulement est importante, plus le potentiel de réduction du bruit dû à la zone 30 est important. En fonction de la valeur caractéristique acoustique d'un revêtement phono-absorbant, une réduction supplémentaire allant jusqu'à -2 dB peut être atteinte avec une zone 30. Ainsi, la mise en place de zones 30 combinée à la pose d'un revêtement phono-absorbant peut s'avérer efficace. La performance acoustique des revêtements routiers est encore meilleure lorsque le taux de poids lourds est faible.

Les recherches qui permettraient d'améliorer davantage les résultats obtenus sont les suivantes: étude de l'impact acoustique d'un fort taux de poids lourds ou de bus dans les zones 30, liens entre différentes mesures constructives et la réduction du bruit, effet combiné des zones 30 et des revêtements phono-absorbants, ou encore l'étude des performances acoustiques dans les zones 30 ayant des tronçons routiers avec une pente de plus de 6%.



## Zusammenfassung

Im verdichteten städtischen Raum stellen Geschwindigkeitsreduktionen neben dem Einbau von lärmarmen Belägen häufig die einzige Möglichkeit dar, übermässigen Strassenlärm gemäss Lärmschutz-Verordnung an der Quelle zu reduzieren. Bei Lärmsanierungsprojekten im Innerortsbereich steht die Einführung von Tempo 30 daher immer häufiger im Fokus. Da die heute verfügbaren Lärmemissionsmodelle in der Schweiz jedoch nicht für den niedrigen Geschwindigkeitsbereich und die Besonderheiten von Tempo 30 Situationen ausgelegt sind, fehlen die Grundlagen um zuverlässige Prognosen zur Lärmwirkung von Verkehrsberuhigungsmassnahmen und der Einführung von Tempo 30 vornehmen zu können.

Im Rahmen des Forschungsprojektes VSS 2012/214 wurden aktuelle Grundlagen zur Beurteilung der Lärmwirkung von Tempo 30 ausgearbeitet, um zukünftig zuverlässigere Prognosen bezüglich des Lärminderungspotentials für niedrige Geschwindigkeiten, insbesondere für Tempo 30, zu gewährleisten. Dazu wurden die Schallemissionen eines aktuellen, für die Schweiz repräsentativen Fahrzeugparks bei unterschiedlichem Fahrverhalten (Gangwahl, unstetige Fahrweise, Fahrstil etc.) in einer umfangreichen Messkampagne systematisch erfasst und in Emissionsansätze für konstantes und beschleunigtes Fahrverhalten überführt. Mithilfe statistischer Erhebungen zum Fahrverhalten an bereits realisierten, häufig vorkommenden Tempo 30 Zonen, sowie eines adaptierten Emissionsansatzes für LKW aus dem Europäischen Emissionsmodell CNOSSOS wurden diese Emissionsansätze in eine Quellenformulierung überführt, welche es ermöglicht Tempo 30 Situationen hinsichtlich ihrer Lärmwirkung mit guter Zuverlässigkeit zu beurteilen. Die Ergebnisse zeigen, dass wesentliche Lärmreduktionen durch die Einführung von Tempo 30 möglich sind. Je nach effektiv gefahrener Geschwindigkeit, Lastwagenanteil und Strassenbelag lassen sich Reduktionen der Lärmpegel (Leq) zwischen ca. 2 dB und 4.5 dB erzielen. Die Berücksichtigung des aktuellen Fahrzeugparks und des Fahrverhaltens ist dabei von zentraler Bedeutung. Weiterhin zeigt sich eine entscheidende Abhängigkeit der Lärmwirkung von der Art der Massnahme bzw. des Zonentyps, mit welcher die Temporeduktion herbeigeführt wird. Die untersuchten Beispiele zeigen, dass auch ohne grosse bauliche Massnahmen erhebliche Geschwindigkeitsreduktionen bei stetigem Verkehrsfluss herbeigeführt werden können und die Lärmemissionen dadurch deutlich gesenkt werden.

Basierend auf der Prognose der Lärmwirkung für verschiedene Tempo 30 Situationen wurden die effektive Geschwindigkeit, der LKW-Anteil sowie die akustische Beschaffenheit der Strassenbeläge als entscheidende Ursachen für die im Rahmen von Fallstudien beobachtete starke Streuung der Lärmwirkung identifiziert. Die durch Tempo 30 effektiv erreichte Geschwindigkeitsreduktion (die Differenz zwischen den effektiv gefahrenen Geschwindigkeiten in der Ausgangssituation und der Zielsituation) bildet eine wesentliche Einflussgrösse bezüglich der Lärmwirkung von Tempo 30. Falls die getroffenen Massnahmen nicht zu einer unstetigeren Fahrweise sowie zum Fahren in kleineren Gängen führen, genügt für die meisten Situationen eine effektive Geschwindigkeitsreduktion von lediglich 10 km/h um wesentliche Lärmreduktionen zu erzielen. Es gilt dabei zu beachten, dass die akustische Wirkung von Tempo 30 mit steigendem LKW-Anteil deutlich abnimmt. Bei LKW-Anteilen von mehr als 15% ist generell nur noch mit einer geringen akustischen Wirksamkeit von Tempo 30 zu rechnen. Des Weiteren hat die akustische Beschaffenheit des Strassenbelages einen wesentlichen Einfluss auf die Lärmwirkung von Tempo 30. Grundsätzlich gilt: Je lauter ein Strassenbelag ist bzw. je stärker er zur Entstehung von Rollgeräuschen beiträgt, desto grösser ist die potentielle Lärmreduktion durch Tempo 30. In Abhängigkeit des Belagskennwerts des lärmarmen Belags kann bei Tempo 30 mit zusätzlichen Wirkungen von bis zu -2 dB gerechnet werden. Entsprechend kann eine Kombination der Lärmschutzmassnahme Tempo 30 mit dem Einsatz von lärmarmen Belägen situativ als zielführend betrachtet werden. Bei tiefen LKW-Anteilen ist eine höhere Wirksamkeit der Strassenbeläge zu erwarten. Empfohlene Forschungsschwerpunkte für zukünftige Untersuchungen bilden die Lärmwirkung von Tempo 30 bei hohen Verkehrsanteilen von LKWs oder Bussen, der Massnahme-Wirkungsbezug, die Kombinationswirkung von lärmarmen Belägen und Tempo 30, sowie die Lärmwirkung

von Tempo 30 auf Streckenabschnitten mit grösseren Steigungen (von über 6%), welche die Prognosezuverlässigkeit weiter steigern könnten.

## Summary

Speed reductions and low noise road surfaces often represent the only option to reduce excessive traffic noise at the source. Noise abatement projects in urban areas therefore increasingly focus on the introduction of limiting speed to 30 km/h. However, existing noise emission models are commonly not designed for such low speeds and the peculiarities of a 30 km/h speed limit. Hence, the basis for a reliable prediction of the noise reduction by traffic calming measures for a 30 km/h speed limit is currently missing.

The research project VSS 2012/214 provides an up-to-date basis for more reliable predictions on the noise reduction potential at low speeds, specifically at 30 km/h speed limit. Noise emissions were systematically assessed for different driving behaviours (gear selection, discontinuous driving and driving style) for a representative and up-to-date vehicle fleet during a comprehensive measurement campaign. The acquired data were further transferred into two separate emission approaches for constant and accelerated driving behaviour. These emission approaches were combined with a statistical survey on the actual driving behaviour at representative 30 km/h speed limit situations and an adapted emission approach for heavy vehicles from the European noise emission model CNOS-SOS and transferred into a source approach. The source approach allows an evaluation of 30 km/h speed limit situations regarding their noise reduction with a good reliability. The noise modelling results from this source formulation show that substantial noise reductions can be achieved by introducing speed limits of 30 km/h. Noise levels ( $L_{eq}$ ) can be reduced between approx. 2 dB and 4.5 dB, depending on the effective driven speed, the proportion of heavy vehicles and the road surface. Using an up-to-date and representative vehicle fleet as well as considering driving behaviour is also of great importance. Additionally, the results show a crucial dependency of the total noise reduction on the situation type and the type of the installed traffic calming measure. The situations investigated show that it is possible to achieve substantial speed reductions and a considerable reduction of noise levels, even without substantial road redesign.

The effective speed, the proportion of heavy vehicles and the acoustic state of the road surface have been identified as the main sources for the variability in the total noise effect observed in various case studies by modelling the noise effect for different 30 km/h speed limit situations. The effective speed reduction is defined by the difference between the real driven speed in the initial and the target situation. While investigating the noise effect of 30 km/h speed limit situations, the effective speed reduction constitutes a crucial parameter for the noise effect. If the implemented traffic calming measures do not lead towards more discontinuous driving behaviour or towards driving in smaller gears, speed reductions of 10 km/h have been shown to be sufficient to realise substantial noise reductions. It is, however, necessary to be aware of the fact that the acoustic effect of a 30 km/h speed limit decreases with an increasing proportion of heavy vehicles. When considering proportions of heavy vehicles of more than 15%, a 30 km/h speed limit will generally only provide a small acoustic improvement.

The acoustic state of the road surface also has a crucial influence on the noise effect of a 30 km/h speed limit. Generally, the louder the road surface or rather the stronger it contributes to the rolling noise formation, the more distinctive is the potential noise reduction of a 30 km/h speed limit. Depending on their specific noise parameters, low noise road surfaces can cause an additional noise effect of up to -2 dB in speed limit 30 situations. Hence, a combination of a speed limit of 30 km/h with a low noise road surface can be advantageous in certain situations. Generally, the acoustic effectiveness of road surfaces is expected to be higher at low proportions of heavy vehicles.

Recommendations for further research is to investigate the noise effect of 30 km/h speed limits at high proportions of trucks or buses, the noise effect of traffic calming measures, the effect of combining low noise pavements and 30 km/h speed limits and the noise effect of 30 km/h speed limits on road sections with slopes (more than 6%), in order to further increase the prediction reliability.





# 1 Introduction

## 1.1 Préambule et problématique

**Obligation d'assainir.** La Loi sur la protection de l'environnement de la Confédération suisse [1] et l'Ordonnance sur la protection contre le bruit (OPB) [2] obligent les propriétaires des routes à assainir les tronçons qui causent un bruit excessif et contribuent de manière notable au dépassement des valeurs limites d'immission (VLI). L'assainissement sonore doit être achevé d'ici 2018 sur les routes principales, de même que sur les autres routes. Des projets d'assainissement sonore comprenant l'étude de mesures de réduction du bruit sont actuellement en cours de réalisation dans la plupart des grandes villes et communes de Suisse.

**Une mesure possible : la réduction de vitesse.** Selon la Loi sur la protection de l'environnement (art. 11, al. 1 LPE), la réduction du bruit doit se faire prioritairement à la source. Les mesures à la source envisageables en premier lieu sont les réductions de vitesse et les revêtements routiers peu bruyants.

**Débat sur la limitation de vitesse à 30 km/h.** Les projets d'assainissement routier à l'intérieur des localités se focalisent de plus en plus sur la limitation de vitesse à 30 km/h. Abaisser la vitesse autorisée de 50 à 30 km/h ou, dans une moindre mesure de 50 à 40 km/h, permet à la fois, d'accroître la sécurité du trafic et d'améliorer la qualité de vie dans les quartiers ; la rue devenant un espace de rencontre. Différentes raisons ont amené les politiciens à renoncer jusqu'à présent à instaurer des limitations de vitesse à 30 km/h sur les axes principaux de circulation. Après les récentes décisions du Tribunal fédéral [3]–[6] et du Tribunal administratif du canton de Berne [7], ce rejet de principe, sans fondement et non corroboré par des arguments factuels, n'est plus tenable. Une requête souvent formulée dans les oppositions aux projets d'assainissement acoustique est la mise à l'étude de la limitation de vitesse à 30 km/h comme mesure de réduction du bruit, également le long des routes principales exposées au bruit. Un débat animé oppose actuellement les partisans et les réfractaires de la limitation de vitesse à 30 km/h le long des axes principaux routiers. Suite à ces discussions, l'efficacité des limitations de vitesse a fait l'objet de plusieurs études afin de déterminer l'impact d'une telle mesure sur le bruit : une étude effectuée dans le canton d'Argovie comprenant des essais routiers à une vitesse maximale de 30 km/h [8], ainsi qu'une étude menée dans les cantons d'Argovie et de Zurich visant à évaluer l'effet de la limitation de vitesse à 30 km/h avec un mode de conduite constant [9]. Les résultats de ces études ont été pris en compte dans le rapport de synthèse de la Commission fédérale pour la lutte contre le bruit (CFLB) intitulé « La limitation à 30 km/h comme mesure de protection contre le bruit » [10].

**Bases actuelles de l'évaluation des mesures antibruit.** Actuellement, l'estimation du potentiel de diminution du bruit des réductions de vitesse se base souvent sur des calculs effectués avec des modèles standardisés. Or, le modèle d'émission de bruit routier en vigueur en Suisse StL86+ [11] (SonRoad [12] étant mieux adapté) ou les modèles utilisés à l'étranger ne sont pas dimensionnés pour ce domaine de vitesse et ne tiennent pas compte des particularités des situations avec une vitesse limitée à 30 km/h (voir aussi paragraphe 1.3). La diminution du bruit que peut entraîner une réduction de vitesse dépend beaucoup de certains facteurs d'influence que les modèles courants, conçus pour des vitesses égales ou supérieures à 50 km/h, ne parviennent pas à décrire. Ces facteurs d'influence englobent notamment la distribution effective de la vitesse, le revêtement prédominant sur la chaussée, la nature des mesures de modulation du trafic, le comportement de conduite, le rapport de vitesse sélectionné, le moteur et les pneumatiques qui prévalent dans l'échantillonnage des véhicules aux niveaux régional et national.

Diverses études de cas et d'études témoins confirment l'importance de ces facteurs d'influence [13]–[16] en mettant en évidence de fortes variations de l'impact acoustique. Les analyses et les conclusions de ces études ne sont guère transposables à d'autres situations. Les bases actuellement disponibles ne permettent que de façon limitée d'établir

des pronostics fiables sur l'impact acoustique des mesures de modération du trafic et des limitations de vitesse à 30 km/h.

## 1.2 Contexte de la recherche

Le bruit routier excessif nuit à la santé et au bien-être des personnes [10]. Afin de protéger la population de ses effets néfastes, certains pays ont instauré des réglementations fixant des valeurs limites d'exposition au bruit. En Suisse, la Loi sur la protection de l'environnement offre une base pour protéger la population [1] contre le bruit. L'application et l'exécution sont régies dans l'Ordonnance sur la protection contre le bruit [2]. Dans le cas du bruit routier, le manuel du bruit routier fournit une aide pour les projets d'assainissement acoustique [17]. Selon les bases légales, il est indifférent que le bruit soit déterminé par mesurage ou par calcul. Pour établir le niveau d'exposition aux nuisances sonores, on aura recours, soit à une campagne de mesurages, soit à un modèle adéquat du bruit du trafic. Par rapport aux mesurages, la modélisation a l'avantage de permettre l'évaluation de l'impact acoustique des nouvelles infrastructures routières et elle peut s'effectuer de manière aisée sur le réseau routier existant. Sur la base des études de cas effectuées jusqu'ici [13]–[15] [18], il n'est pas possible d'établir de règle générale pour pronostiquer la diminution du bruit consécutive à la réduction de vitesse planifiée, car la modération du trafic dans le domaine des basses vitesses fait souvent intervenir diverses mesures de construction et d'aménagement susceptibles d'avoir une influence déterminante sur le comportement de conduite, et donc sur l'impact acoustique [10] [19]. Pour obtenir des pronostics fiables, chaque source d'influence acoustique (distribution de la vitesse, comportement de conduite, revêtement routier, etc.) doit être isolée et quantifiée. Ces aspects n'ont pas été suffisamment examinés dans les études nationales et internationales menées jusqu'ici [20] [21]. Il faut en outre tenir compte de la multiplication, du développement et du perfectionnement des infrastructures routières et des véhicules de toutes catégories propres à l'époque actuelle ; ce qui se traduit, en particulier dans les pays très développés [22] tels que la Suisse, par un changement des émissions sonores et de leur composition.

## 1.3 Comparaison entre les modèles existants

Ce chapitre dresse un tableau de quelques modèles de bruit routier parmi les plus courants et les compare qualitativement entre eux (voir **Tableau 1**).

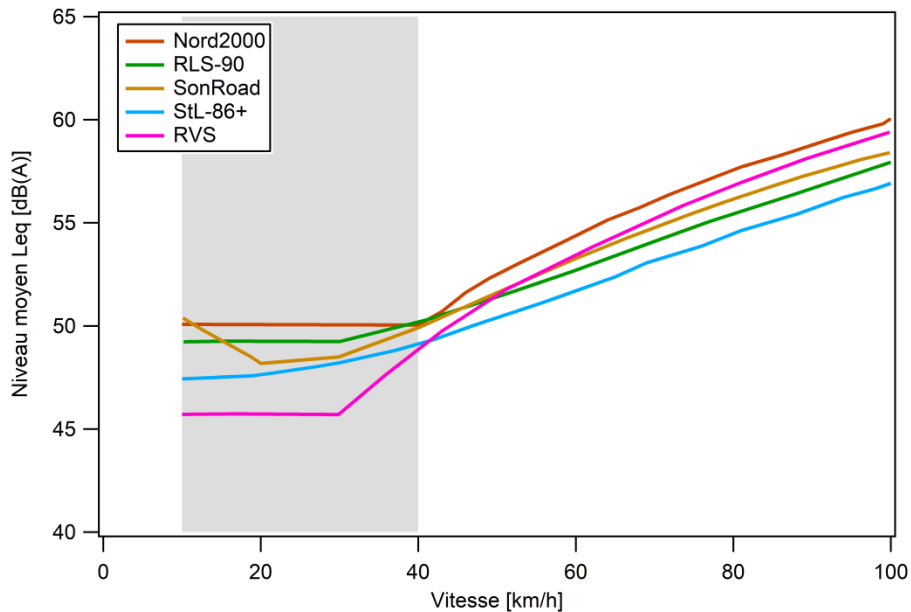
**Tableau 1 : Comparaison entre les modèles de bruit routier couramment utilisés.**

	StL86+ [11]	sonRoad [12]	CNOSSOS [23]	RLS-90 (Mobilev) [24]	Nord2000 [25]
Catégorie de véhicules	VT, camions	VT, camions	VT, camions (2 essieux et plus), 2RM*	VT, camions (véhicules utilitaires légers et lourds)	VT, camions (2 essieux et plus)
Domaine de vitesse [km/h]	env. 50-120	env. 30-120	20 à 130	n/d	30 à 130
Résolution spectrale	Niveau cumulé	Bande de tiers d'octave	Bande d'octave	Niveau cumulé	Bande de tiers d'octave
Source de bruit modélisée	Bruit global	Roulement et propulsion	Roulement et propulsion	Roulement et propulsion	Bruit global
Année de la flotte des véhicules	< 1987	< 2004		< 1970 [26]	< 2006
Accélération et freinage du véhicule	Non inclus	Non inclus	Facteur constant	-	Facteur constant

\* : deux-roues motorisés

Le **Tableau 1** montre que de nombreux modèles couramment utilisés se basent souvent sur des données relativement anciennes, qui ne peuvent refléter que de manière très approximative les standards techniques de la flotte des véhicules actualisée. Ceci est problématique dans la mesure où les progrès techniques réalisés dans l'industrie automobile ont entraîné un déplacement des principales sources de bruit. Les raisons déterminantes sont des moteurs moins bruyants, une qualité d'usinage et du montage des composantes

des véhicules et l'élargissement constant des pneus. La **Figure 1** permet de comparer directement les émissions de bruit routier pronostiquées au moyen des différents modèles.



**Figure 1 :** Représentation graphique de la marge de fluctuation des modèles d'émissions sonores couramment utilisés pour les voitures de tourisme (adapté de [27]).

En comparant les émissions sonores calculées avec les différents modèles à la **Figure 1**, on constate que les modèles concordent davantage entre eux lorsque les vitesses sont plus élevées (à partir de 40 km/h), alors que l'écart entre les valeurs pronostiquées est plus important dans le domaine des basses vitesses (inférieures à 40 km/h). Cet écart est vraisemblablement dû au fait que les données sur lesquelles se fondent ces modèles ont été recueillies à des vitesses égales ou supérieures à 50 km/h et qu'elles n'autorisent que très partiellement un calibrage des paramètres de modèles pour le domaine des basses vitesses.

## 1.4 Besoins en matière de recherche

L'étude de Quartieri et al. (2009) [20], qui décrit en détails et évalue les modèles de bruit routier les plus couramment utilisés, conclut que leur capacité prédictive se limite à l'échantillon statistique recueilli pour chacun d'eux, et qu'ils ne prennent par conséquent pas suffisamment en compte les composantes aléatoires du trafic [28]. La formulation d'un modèle idéal requiert qu'on représente les caractéristiques du trafic, à travers les différents modes de conduite et propriétés des véhicules, sans présumer une vitesse collective. Pour pouvoir émettre des constats universellement valables sur l'impact acoustique des réductions de vitesse, il est donc absolument nécessaire d'isoler et de quantifier les grandeurs d'influence les plus importantes dans le domaine des basses vitesses.

### 1.4.1 La vitesse comme paramètre d'influence

Pour décrire l'influence de la vitesse sur le bruit routier dans le domaine des basses vitesses (<50 km/h), il faut considérer séparément ses deux sources principales, le bruit de propulsion (bruit du moteur, de la boîte de vitesses et du pot d'échappement) et le bruit de roulement (émissions sonores dues à l'interaction entre les pneus et la surface de la chaussée). Les recherches en acoustique ont établi que pour les voitures récentes, fabriquées depuis le milieu des années 1990, le bruit de roulement est dominant à partir d'une vitesse d'env. 15-25 km/h déjà, et pour les camions récents, à partir de 30-40 km/h [29]. On constate en outre que le bruit de roulement est plus fortement influencé par la vitesse que le bruit de propulsion, car celui-ci, principalement lié à la vitesse de rotation du mo-

teur et à sa charge (performance sollicitée), peut être maintenu à un niveau constant en changeant le rapport de vitesse lorsque le trafic est fluide [30]. Dans le domaine des basses vitesses, les deux principales sources de bruit se conjuguent de manière complexe en fonction des situations. Pour pouvoir calculer avec précision l'impact acoustique de la vitesse de conduite, il faut donc connaître le comportement des deux principales sources de bruit du domaine des basses vitesses.

#### **1.4.2 L'influence du comportement de conduite**

Les vitesses de conduite sont plus rarement constantes dans le domaine des basses vitesses qu'à des vitesses plus élevées. Aux basses vitesses, le comportement de conduite devient donc une grandeur d'influence décisive [31], [32]. Le conducteur influe sur les émissions sonores par sa stratégie de changement de rapport de vitesse et son style d'accélération, qui peut être prévoyant ou sportif/agressif [33], [34]. Le comportement de conduite détermine non seulement le nombre de tours du moteur, mais aussi les pics de vitesse et d'accélération ; il a donc un effet direct sur les émissions sonores. Peu d'informations sont actuellement disponibles sur l'impact acoustique du comportement de conduite.

#### **1.4.3 Évolution de la flotte des véhicules et des pneus**

En raison des développements que l'industrie automobile a apporté aux véhicules et aux pneus, les émissions sonores du trafic routier n'ont cessé d'évoluer durant les dernières décennies [22]. La composition et le stade de développement de la flotte des véhicules sont des composantes importantes des modèles de bruit routier et ils ont une influence déterminante sur la simulation effectuée par modèle [20]. Les émissions sonores des véhicules varient également en fonction de la composition des pneus (indiquée sur l'étiquette des pneus européenne ou suisse). L'impact des différents types de pneus est plus marqué dans le domaine des basses vitesses car des changements dans la composition des principales sources de bruit peuvent entraîner des décalages plus importants au niveau des émissions globales [35]. Les modèles d'émission standards disponibles aux niveaux national et international se basent pour la plupart sur une flotte de véhicules datant des années 1980 et 1990 ainsi que du début des années 2000. Pour pouvoir évaluer de manière fiable l'impact acoustique des mesures de modération du trafic, la prise en compte de la flotte des véhicules moderne et de ses pneus est indispensable.

#### **1.4.4 L'influence des mesures de construction**

Le conducteur n'est pas toujours en mesure de déterminer lui-même son comportement de conduite [36]. Il peut être forcé de l'adapter aux constructions présentes dans l'espace routier, telles que dos d'âne ou autres obstacles (décrochements horizontaux, rétrécissements latéraux, décrochements verticaux) [37]. Ces mesures sont certes susceptibles de produire les effets souhaités en diminuant le bruit (le conducteur étant obligé de ralentir) mais elles peuvent avoir un impact négatif sur les émissions sonores, par exemple en entraînant une multiplication des phénomènes d'accélération [38]. On dispose de quelques études de cas au sujet de l'impact acoustique des mesures de modération du trafic [39]–[42], mais il n'est guère possible d'en tirer des conclusions de portée générale.

#### **1.4.5 L'influence des mesures d'aménagement**

Les mesures d'aménagement de l'espace routier telles que marquage de la chaussée, marquage de la zone et autres éléments de signalisation sur les bords de la route ont également un impact sur le comportement de conduite. L'influence de telles mesures sur la vitesse de conduite est actuellement l'un des thèmes phares de la recherche en ingénierie des transports.

### 1.4.6 L'influence du revêtement routier

Les chercheurs s'accordent sur le fait que le bruit de roulement peut dominer également à basses vitesses, lorsque *le trafic est fluide* [43]. Le revêtement routier est donc susceptible d'avoir une influence déterminante sur les émissions sonores lorsque la vitesse est limitée à 30 km/h. Etant donné l'évolution actuelle de la flotte des véhicules et des pneus en circulation, cette influence va probablement augmenter dans le domaine des basses vitesses [44].

## 1.5 Buts du travail de recherche

Cette recherche vise principalement à constituer des bases actualisées pour évaluer l'impact acoustique de la limitation de vitesse à 30 km/h, afin de pouvoir pronostiquer de manière fiable le potentiel de réduction du bruit dans le domaine des basses vitesses, en particulier à 30 km/h. Il en découle plusieurs objectifs :

- Effectuer un relevé séparé du bruit de roulement et du bruit de propulsion d'un très vaste échantillon de types de véhicules, avec des modes de propulsion et des pneus représentatifs ; l'étude se focalisant sur les voitures de tourisme ;
- Déterminer une formule d'émission pour le domaine des basses vitesses, à vitesse constante et pour différents rapports de vitesse / régimes du moteur ;
- Intégrer une formule d'émission pour les camions adaptée du modèle d'émission européen CNOSSOS, afin d'estimer approximativement l'influence des camions sur l'impact acoustique de la limitation de vitesse à 30 km/h ;
- Déterminer une formule d'émission pour différents modes de conduite ;
- Effectuer un relevé statistique des modes de conduite dans des situations où la limitation de vitesse à 30 km/h est déjà en vigueur ;
- Identifier les principaux facteurs qui influencent l'impact acoustique de la limitation de vitesse à 30 km/h ;
- Élaborer des formules sources en fusionnant les résultats de l'enquête statistique et la formule d'émission établie ;
- Valider l'hypothèse source avec les données obtenues par des mesurages indépendants.



## 2 Méthodes

### 2.1 Concept d'enquête

Après une intense phase de planification, un concept en quatre étapes a été élaboré pour la mise en œuvre du projet de recherche (voir

Figure 2).

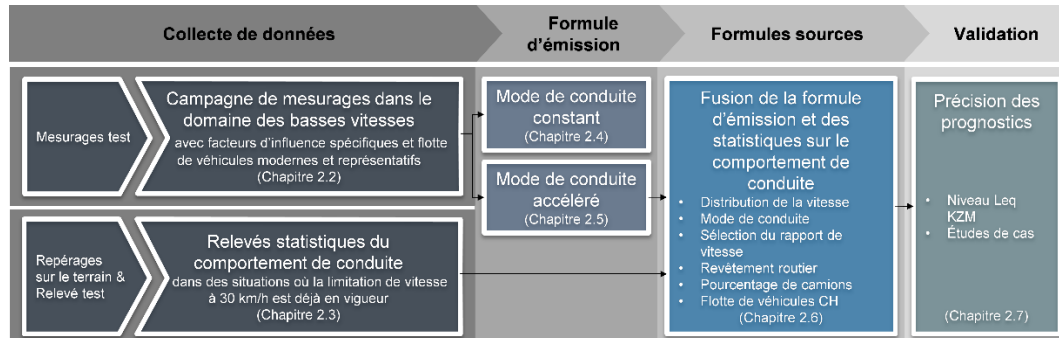


Figure 2 : Concept d'analyse du projet de recherche.

**Collecte des données.** La phase de collecte des données comprend deux volets. Le premier volet concerne la collecte, par des techniques de mesurages, des données de base servant à déterminer une formule d'émission qui tienne compte des facteurs d'influence spécifiques dans le domaine des basses vitesses à partir d'une flotte de véhicules moderne et représentative. Le second volet vise le paramétrage de la formule d'émission ; il concerne la collecte de données statistiques sur le comportement de conduite dans des situations où la limitation de vitesse à 30 km/h est déjà en vigueur. Ces données sont ensuite comparées à une situation de référence avec limitation de vitesse à 50 km/h. La campagne de mesurages a été précédée par des mesurages tests au cours desquels des concepts de collecte complexes ont pu être testés et évalués par des experts internes et externes. Ces mesurages tests avaient plusieurs objectifs : vérifier l'adéquation des instruments de mesure, ainsi que la conception, le déroulement et le protocole des mesurages, évaluer les besoins en espace et en temps et la clarté des instructions données aux collaborateurs bénévoles et aux ingénieurs chargés des mesurages, préparer l'exploitation des données.

**Formule d'émission.** La deuxième phase est consacrée au traitement adéquat des données recueillies durant la première phase et au développement d'une formule d'émission spectrale pour le domaine des basses vitesses. La formule d'émission peut être *grosso modo* articulée en deux composantes : la formule d'émission pour la conduite à vitesse constante et la formule d'émission pour la conduite accélérée. Les deux composantes s'appuient l'une et l'autre sur les données recueillies durant la campagne de mesurages de la première phase de collecte des données.

**Formules sources.** La troisième phase comprend le développement de formules sources pour trois types de zones limitées à 30 km/h et considérées comme représentatives, et prenant en compte la distribution de la vitesse et le comportement de conduite typiques à chaque zone. Les formules sources mettent essentiellement en rapport les données issues des relevés statistiques sur le terrain et la formule d'émission élaborée pour le domaine des basses vitesses.

**Validation.** Durant la quatrième et dernière phase, on cherche à déterminer le degré de précision des pronostics fournis par le modèle ainsi développé. Pour ce faire, les mesurages acoustiques effectués à proximité des émissions lors des relevés statistiques sont comparés avec les résultats du nouveau modèle.

## 2.2 Collecte de données pour l'élaboration de la formule d'émission dans le domaine des basses vitesses

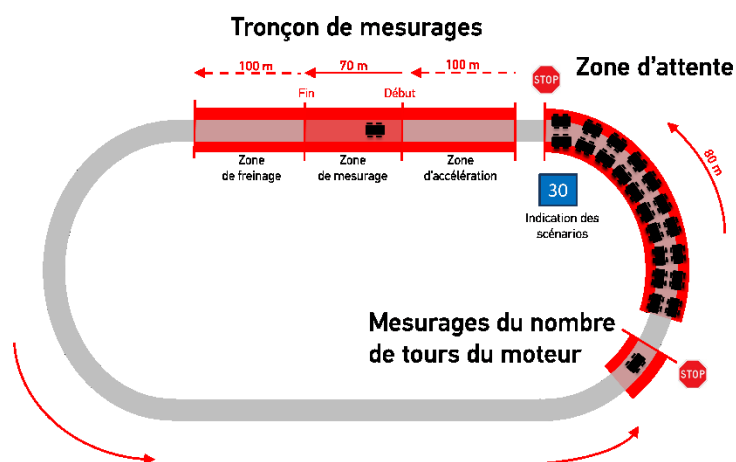
### 2.2.1 Concept de mesurages

Le but principal de la collecte de données pour l'élaboration de la formule d'émission dans le domaine des basses vitesses est de déterminer les émissions sonores des véhicules modernes dans le domaine où s'opère la transition complexe entre le bruit de roulement et le bruit de propulsion et de caractériser l'influence de la conduite discontinue souvent observée dans de telles situations.

La campagne de mesurages a été effectuée le 22 avril 2015 sur une piste d'essai. Les relevés comprennent des mesurages globaux et des mesurages des bruits de roulement et de propulsion d'une large sélection de véhicules représentatifs de la flotte de véhicules suisse. Les émissions sonores ont été mesurées selon différents scénarios, à vitesse constante ainsi qu'avec différents rapports de vitesse, respectivement régimes de moteur pour différentes classes de véhicules. Des accélérations ont été effectuées, tant après l'arrêt du véhicule que durant sa marche, selon plusieurs modes de conduite, afin de spécifier l'impact acoustique des différents types d'aménagement des zones où la vitesse est limitée à 30 km/h.

Les propriétés spécifiques des différents types de véhicules, modes de propulsion et pneus ont été prises en compte à l'aide d'une flotte de véhicules comprenant 22 véhicules différents. Les données statistiques des véhicules ont été ultérieurement utilisées pour pondérer l'échantillon de manière à obtenir une image représentative de la composition actuelle de la flotte des véhicules suisse.

En raison du grand nombre de trajets nécessaires pour les mesurages (22 véhicules et 18 scénarios) et pour garantir la sécurité des participants volontaires aux essais, la campagne de mesurages s'est déroulée sur un terrain fermé à la circulation routière ; celui du Dynamic Test Center à Vauffelin (BE). Offrant la possibilité d'installer des zones de maintenance, d'accélération, de mesurages et de freinage, le terrain d'essai dispose de l'infrastructure nécessaire pour aménager un circuit. Outre l'absence de sources de bruit dans les environs immédiats du tronçon servant aux mesurages, le terrain possède un revêtement bitumeux standard (AC 11) dans la zone de mesurages et offre une surface suffisante pour mesurer la vitesse de rotation du moteur dans un secteur distinct. La **Figure 3** présente un schéma du circuit utilisé pour la campagne de mesure pour l'élaboration de la formule d'émission dans le domaine des basses vitesses. Un plan détaillé du terrain du DTC se trouve à l'**Annexe II.2**.



**Figure 3** : Schéma du circuit de la campagne de mesurages des valeurs d'émission dans le domaine des basses vitesses.



## 2.2.2 Flotte de véhicules

La flotte de véhicules utilisée pour la campagne de mesurages se composait de 22 véhicules, certains ayant été mis à disposition par des volontaires et par des collaborateurs de G+P AG, d'autres ayant été loués de manière ciblée. La flotte de véhicules est assemblée de telle manière qu'elle comprend les quatre modes de propulsion usuels (essence, diesel, hybride, électrique) ainsi qu'un nombre représentatif des véhicules circulant en Suisse, répartis selon six catégories. Le **Tableau 2** dresse une liste complète de la flotte de véhicules testée.

**Tableau 2:** Flotte de véhicules de la campagne de mesurages des valeurs d'émission dans le domaine des basses vitesses.

Véh.	Marque	Type	Catégorie de véhicule	Propulsion
1	Ford USA	Mustang 5.0i-V8 GT	Voiture de sport	Essence
2	Volkswagen	Touran	Combi/Limousine/Monospace	Essence
3	Toyota	Highlander	SUV/Véhicule tout-terrain	Hybride
4	Audi	A1 1.4 TFSI CoD Sportsback	Petite voiture/Voiture compacte	Essence
5	Toyota	Auris HSD	Combi/Limousine/ Monospace	Hybride
6	Volkswagen	Touran 2.0D Blue Motion	Combi/Limousine/ Monospace	Diesel
7	Subaru	Impreza	Combi/Limousine/ Monospace	Diesel
8	Volkswagen	T5 California TDI	Minibus/Fourgon aménagé	Diesel
9	Volkswagen	Golf VII 1.4 TSI 5	Petite voiture/Voiture compacte	Essence
10	Volvo	XC60 D3 AWD	SUV/Voiture tout-terrain	Diesel
11	Citroën	C4 Picasso 1.6i	Combi/Limousine/ Monospace	Essence
12	Volkswagen	Golf VI 1.4 TFSI	Petite voiture/Voiture compacte	Essence
13	Renault	Espace 2.0 DCI	Minibus/Fourgon aménagé	Diesel
14	BMW	i3	Petite voiture/Voiture compacte	Électrique
15	Skoda	Octavia C 1.8 TFSI	Combi/Limousine/ Monospace	Essence
16	Audi	A3 SB 2.0 TDI	Petite voiture/Voiture compacte	Diesel
17	Peugeot	308 SW 1.6 HDI FAP	Combi/Limousine/ Monospace	Hybride
18	VW	e-Golf	Petite voiture/Voiture compacte	Électrique
19	Mini	Cooper	Petite voiture/Voiture compacte	Essence
20	Toyota	Previa 2.4	Combi/Limousine/ Monospace	Essence
21	Mercedes-Benz	Viano 3.0 CDI	Minibus/Fourgon aménagé	Diesel
22	Mercedes-Benz	313 CDI	Voiture de livraison (3,5t)	Diesel

Les indications concernant les types de pneus de la flotte de véhicules sont données aux **Tableau 3** (taille des pneus) et **Tableau 4** (âge des pneus, type de pneus, étiquette des pneus concernant l'efficacité en matière de carburant).

**Tableau 3:** Indications de la taille des pneus de la flotte des véhicules.

Section du pneu [mm]	Largeur du pneu [mm]				Total
	<195	195-205	215-235	>235	
< 40	0	0	0	1	1
40 - 50	0	0	2	3	5
51 - 60	0	8	2	2	12
> 60	1	1	2	0	4
Total	1	9	6	6	22

Le **Tableau 3** concernant la taille des pneus montre que la tendance est à des pneus plus larges (la largeur moyenne des pneus du modèle européen CNOSSOS n'est que de 187 mm [23]). Les pneus de 12 véhicules sur 22 présentent une largeur de plus de 215 mm, alors que 6 véhicules (env. 1/4 de la flotte des véhicules) ont des pneus dont la largeur est supérieure à 235 mm. La largeur moyenne des pneus est de 219 mm sur des jantes R17.

D'autres propriétés des pneus des véhicules sont indiquées au **Tableau 4**.

**Tableau 4:** Indications concernant l'âge, le type et l'étiquette (acoustique et efficacité en matière de carburant) des pneus de la flotte des véhicules.

Année de fabrication	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Total
Nombre de véhicules	1	5	3	4	7	2	22

Saison	Été	Hiver	Total
Nombre de véhicules	16	6	22

Bruit de roulement [dB]	≤ 68	69 - 70	71 - 72	≥ 73	n. d.	Total
Nombre de véhicules	3	6	9	3	1	22

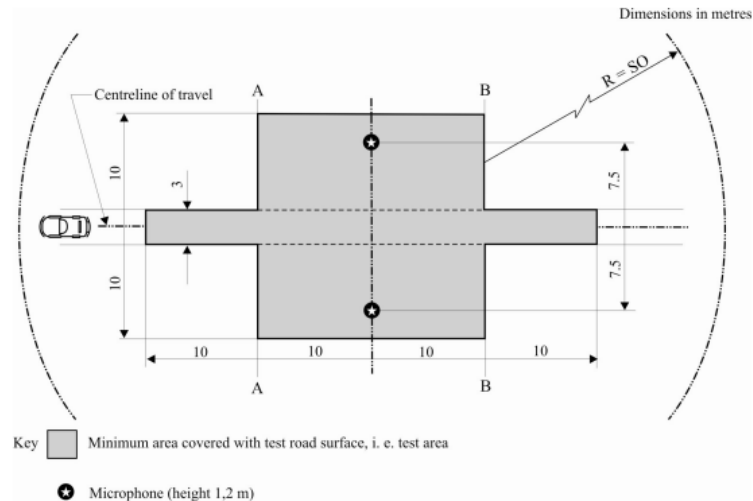
Efficacité énergétique	A	B	C	D	E	n. d.	Total
Nombre de véhicules	2	2	9	0	7	1	21

Comme on le voit au **Tableau 4**, l'ensemble de l'échantillon va de pneus presque neufs à des pneus âgés de cinq ans. Les pneus d'été étant nettement dominants par rapport aux pneus d'hiver. Grâce à l'étiquette européenne des pneus, il est possible de classer ceux-ci dans des catégories en fonction de leurs propriétés acoustiques et de leur efficacité en matière de carburant.

On trouvera à **l'Annexe I.1** une liste complète des types de véhicules avec des indications détaillées concernant le moteur, le poids, les spécifications techniques et les pneus des véhicules.

### 2.2.3 Procédure de mesurage

L'étude fait intervenir trois types de mesurages de passage selon 18 scénarios différents (sessions de mesurages), pour permettre de déterminer séparément les bruits de roulement et de propulsion des passages à vitesse constante ainsi que le bruit global lors de l'accélération : mesurages *Coast-By*, mesurages *Controlled pass-by* et mesurages *Acceleration pass-by*. Concernant le paramétrage, les niveaux maximaux ont été relevés en bandes de tiers d'octave entre 31.5 Hz et 5 KHz. Les mesurages à l'arrêt sont effectués selon une configuration simplifiée avec un seul canal de mesurages, la position du microphone est ajustée en fonction de la géométrie de chaque véhicule. Pour quantifier l'influence du revêtement sur les émissions sonores, les propriétés acoustiques du revêtement ont été mesurées au préalable avec la méthode *Close-Proximity* (CPX). Pour un relevé standardisé des émissions sonores, tous les mesurages de passage sont effectués conformément aux normes UNECE R117 et ISO 11819-1. Un dispositif de mesurage est constitué de deux microphones (avec pare-vent) et des appareils de mesures correspondants, placés à 7.5 m à partir de l'axe de la chaussée et à 10 m des points de départ (A) et d'arrivée (B), des deux côtés de la zone de mesurages à 1.2 m du sol (voir **Figure 4**). Les effets géométriques dus à un écart du tracé exact de chaque passage peuvent ainsi être compensés et en grande partie éliminés.



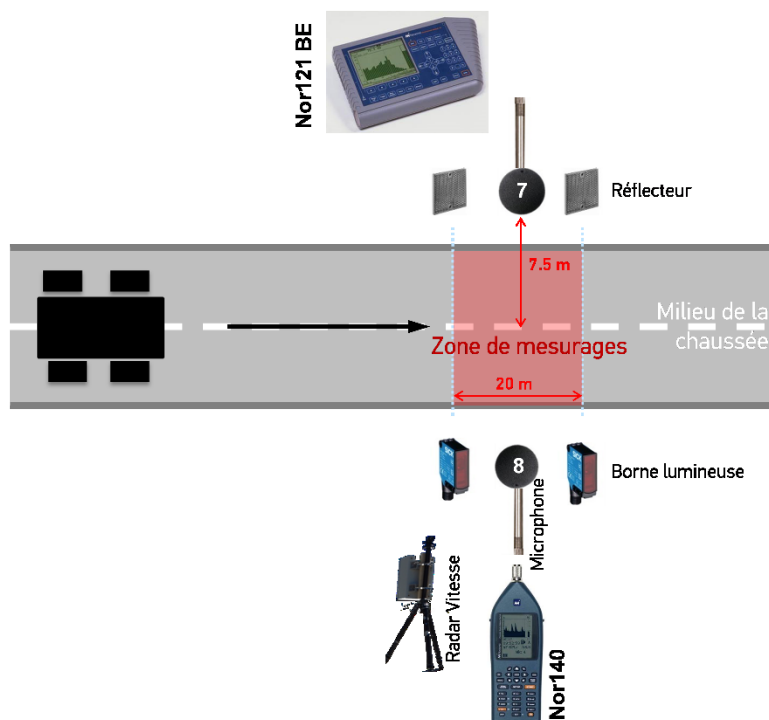
**Figure 4 :** Dispositif de mesures de passages selon UN EC R117 (Source:[45]).

L'entrée (A) d'un véhicule dans la zone de mesures ainsi que sa sortie (B) sont captées par des bornes lumineuses en liaison électronique avec les appareils de mesure du niveau sonore. Les bornes lumineuses sont positionnées de manière à indiquer le début et la fin de la zone de mesures à une distance de 10 m de la ligne qui relie les deux microphones. Le passage de la première borne lumineuse déclenche l'enregistrement du son, qui s'arrête au passage de la seconde borne. La capture du signal permet de tracer le passage du véhicule sur exactement 20 m.

La température de l'air est relevée et enregistrée à intervalles réguliers avec un thermohygromètre. La température de la surface du revêtement est également régulièrement enregistrée avec un pyromètre (thermomètre à rayonnement). Durant les mesures, les vitesses de conduite de chaque véhicule sont relevées et enregistrées séparément à l'aide d'un radar.

### Mesurages Coast-by

Pour l'étude du bruit de roulement, on utilise la méthode *Coast-by* avec un moteur arrêté et découplé. Sur un tronçon d'accélération, le véhicule accélère jusqu'à une vitesse constante. Juste avant son entrée dans la zone de mesure, le moteur est découplé et arrêté. À l'intérieur de la zone de mesure, on relève le signal acoustique du passage du véhicule avec moteur éteint et découplé sur une distance de 20 m. Des mesures du bruit de roulement sont effectués pour tous les véhicules à des vitesses de 20, 30, 40 et 50 km/h. La **Figure 5** présente un schéma du dispositif de mesures.



**Figure 5 :** Dispositif de mesure des émissions pour un comportement de conduite constant (mesurage Coast-by, mesurage Controlled Pass-by). Le mesurage a été effectué aux positions des microphones 7 et 8 au moyen d'un dispositif complexe comprenant un total de 10 microphones.

### Mesurages *Controlled Pass-by*

Pour le relevé du bruit global des véhicules, on utilise la méthode *Controlled Pass-by*. Le véhicule accélère sur un tronçon d'accélération jusqu'à une vitesse constante prédéfinie. La zone de mesurages est traversée à une vitesse constante et le bruit global (bruits de roulement et de propulsion) mesuré sur une distance de 20 m. Pour obtenir une représentation la plus complète possible pour les basses vitesses, les mesurages de passage sont effectués pour tous les véhicules avec différentes combinaisons rapport de vitesse vitesse de conduite (voir **Tableau 5**). Ce dispositif de mesurages est représenté par un schéma à la **Figure 5**.

**Tableau 5 :** Scénarios pour les mesurages du bruit global avec la méthode *Controlled Pass-by*.

Vitesse de conduite	Rapport de vitesse
20 km/h	1, 2
30 km/h	1, 2, 3
40 km/h	2, 3
50 km/h	2, 3, 4

### Mesurages *Acceleration Pass-by*

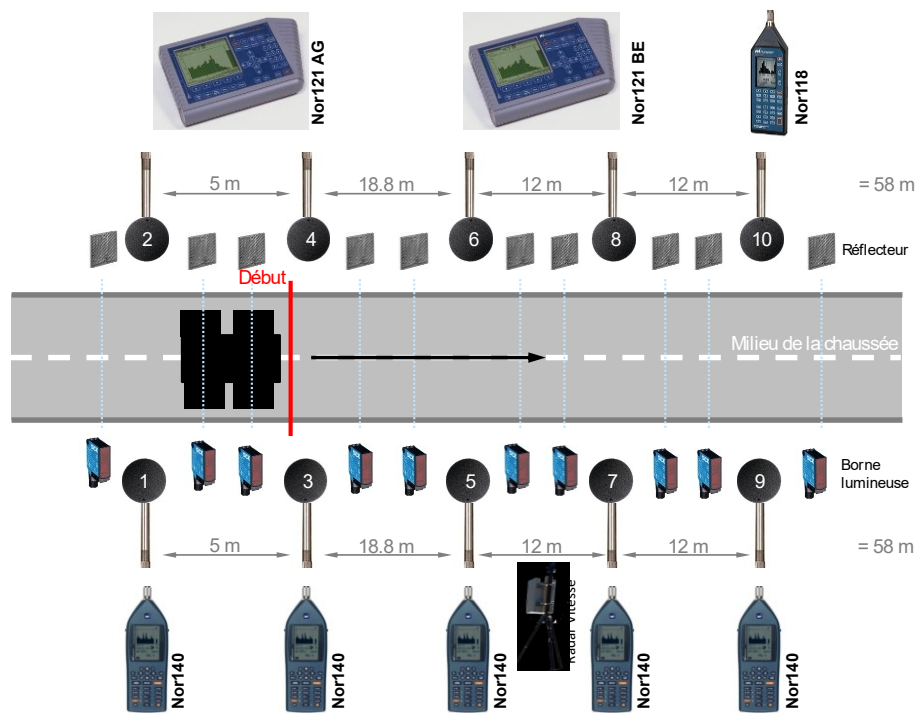
Les mesurages d'accélération servent à relever les émissions sonores lors du freinage complet, de l'arrêt et du processus d'accélération qui suit, comme par exemple en raison d'une mesure de construction dans une zone où la vitesse est limitée à 30 km/h ou lorsque le mode de conduite est discontinu, ce qui est souvent le cas lorsqu'il y a confusion concernant la priorité de droite ou en présence de décrochements verticaux. Afin de représenter le comportement de conduite des différents types de conducteurs, les relevés

sont effectués selon deux scénarios comprenant chacun deux variantes de style de conduite, agressif et prévoyant (voir **Tableau 6**). Le parcours mesuré consiste en une séquence de cinq zones de mesurage successives de 20 m, chacune se chevauchant partiellement et permettant de saisir l'intégralité des différentes phases du processus d'accélération. Chaque zone de mesurage est dotée d'un couple de microphones qui relève séparément les émissions de bruit sur un segment de mesurage de 20 m.

**Tableau 6 : Scénarios pour les mesurages d'accélération.**

Vitesse de conduite	Rapport de vitesse	Caractérisation du style de conduite	Caractérisation du comportement d'accélération
0 à 30 km/h	1 à 2	Agressif	Avec arrêt
0 à 30 km/h	1 à 2	Prévoyant	Avec arrêt
25 à 35 km/h	2 à 3	Agressif	Discontinu
25 à 35 km/h	3	Prévoyant	Discontinu

Pour relever le plus précisément possible les émissions de bruit du tuyau d'échappement et du moteur au début du processus d'accélération, celui-ci démarre pour chaque véhicule entre les positions des microphones 1 et 3 (voir **Figure 6**). Les émissions sonores de la suite du processus d'accélération et du processus de changement de rapport de vitesse sont continuellement mesurées avec les positions des microphones 5 à 10.

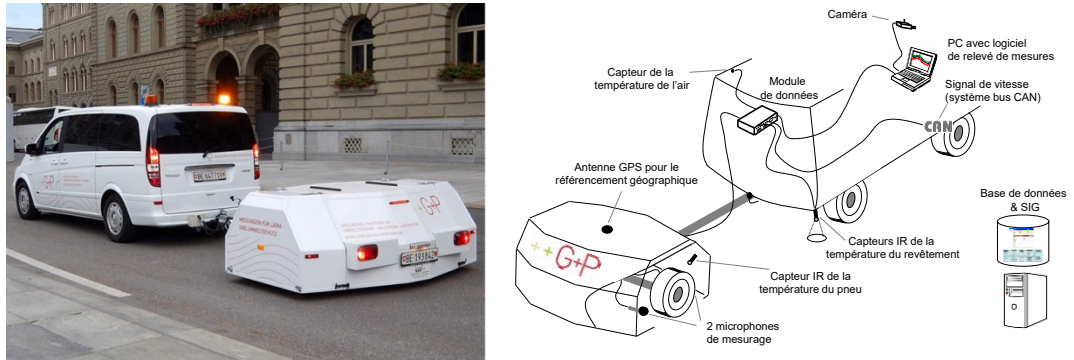


**Figure 6 : Dispositif de mesure d'émission relatif au comportement de conduite accéléré.**

### Mesurage des propriétés du revêtement *Close-Proximity* (CPX)

Pour être à même de prendre en compte dans la formule d'émission l'influence du revêtement sur le niveau sonore relevé durant les mesurages de passage, les propriétés du revêtement sont mesurées sur la piste d'essai de Vauffelin avec la méthode *Close-Proximity* (CPX) selon ISO 11819-2 [46] et ISO 11819-3 [47]. La méthode qui utilise une remorque de mesurage permet de déterminer les propriétés acoustiques des revêtements routiers par un mesurage direct et continu du bruit que produit le contact entre les pneus et la chaussée. Le système de mesurages CPX mesure le niveau sonore à proxi-

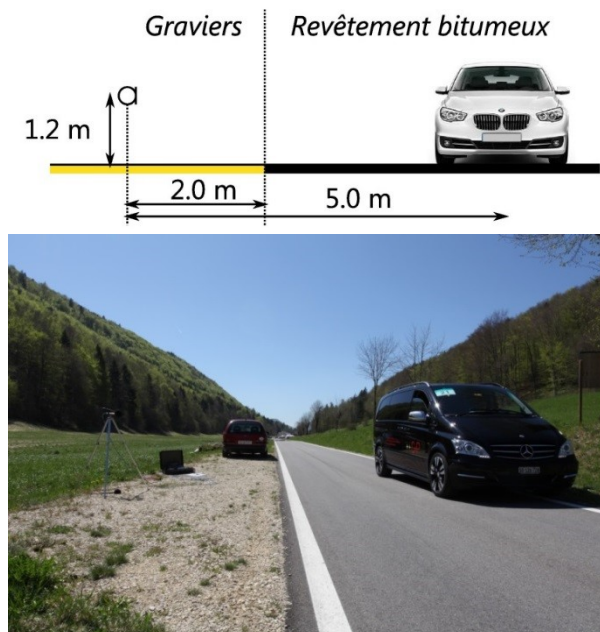
mité immédiate des pneus avec deux microphones placés dans deux caissons insonorisés à l'intérieur de la remorque. Deux jeux de pneus sont mesurés : Uniroyal Tigerpaw (SRTT) 225/60-R16 (pneus de test P1 pour voiture de tourisme) et Avon AV4 195-R14C (pneus de test H1 pour camion).



**Figure 7 :** Photo et schéma du système de mesures CPX.

### Mesurages à l'arrêt

Les mesurages de la vitesse de rotation du moteur sont effectués à l'arrêt et avec le moteur déconnecté. Le bruit du moteur est enregistré séparément pour chaque véhicule avec un microphone placé à une distance de 7.5 m et à l'aide d'un appareil de mesure Norsonic 121 (voir **Figure 8**). Des enregistrements audio strictement bi-canal sont en outre enregistrés avec un B&K 4006 à 1.2 m et 0.0 m. Les émissions de bruit sont relevées pour chaque véhicule pendant 10 s avec moteur tournant au ralenti, puis à 1'500, 2'000 et 3'000 tr/min. Les résultats des mesurages à l'arrêt ne sont pas présentés dans ce rapport, mais ils servent pour la vérification sommaire des modèles de bruit de propulsion spécifiques des véhicules.



**Figure 8 :** Dispositif pour mesurages à l'arrêt.

## 2.2.4 Évaluation sommaire des différents types de pneus

L'utilisation de différentes combinaisons de pneus sur un même véhicule et avec des conditions environnementales constantes doit permettre une évaluation sommaire des effets des différents types de pneus. À cet effet, la campagne de mesurages principale a été directement suivie d'une autre série de mesurages sur la piste d'essai du DTC AG à Vauffelin. Les mesurages du bruit de roulement de trois véhicules sélectionnés dans la flotte de véhicules de la campagne principale sont répétés avec un autre jeu complet de pneus comprenant quatre pneus.

L'impact acoustique des pneus a été examiné selon les variantes suivantes :

- Pneus d'été standards vs. Pneus d'hiver standards
- Pneus d'été standards vs. Pneus d'été peu bruyants
- Pneus d'été étroits vs. Pneus d'été larges

Le **Tableau 7** donne des indications sur les trois véhicules sélectionnés et sur les variantes de pneus mesurées.

**Tableau 7 : Vue d'ensemble des véhicules et des spécifications des pneus pour l'évaluation approximative des différents pneus.**

Véh.	Type de véhicule	Catégorie de véhicule	Catégorie de pneus	Type de pneus & spécifications
9	VW Golf VII 1.4 TSI 5	Petite voiture / Voiture compacte	Pneus d'été	1) Bridgestone Turanza ER300 205/55 R16 91V
			Pneus d'hiver	2) Goodyear Ultragrip 9 M+S 205/55 R 16 91T
15	Skoda Octavia C 1.8 TFSI	Combi / Limousine / Monospace	Pneus d'été standards	1) Bridgestone Turanza ER300 205/55 R16 91V
			Pneus d'été peu bruyants	2) Dunlop SportMaxx 205/55 R16 91Y
10	Volvo XC60 D3 AWD	SUV / Voiture tout- terrain	Pneus d'été larges	1) Pirelli Scorpion Zero 255/45 R20 105
			Pneus d'été étroits	2) Continental Sport Contact 5 215/50 R17 95W XL

## 2.3 Collecte de données sur le comportement de conduite statistique

### 2.3.1 Concept de mesurage

Les relevés statistiques effectués dans des situations où la limitation de vitesse à 30 km/h est déjà en vigueur sont l'un des éléments centraux de la présente recherche. Ils permettent une étude statistique du comportement de conduite. Durant les mois de septembre et octobre 2015, des relevés statistiques ayant trait au comportement de conduite ont été effectués sur mandat de la Ville de Zurich dans cinq sections de mesures à Zurich et à Köniz (BE) ainsi que dans une situation de référence avec limitation de vitesse à 50 km/h. Les enquêtes statistiques doivent être considérées comme un complément au projet de recherche ; elles visent de manière générale à améliorer la fonctionnalité et l'adéquation avec le terrain des formules sources. L'enquête vise à déterminer et à caractériser le comportement de conduite typique, la vitesse de conduite, le rapport de vitesse sélectionné et le mode d'accélération qui prédominent dans la réalité pour les voitures de tourisme dans les principales situations types où la vitesse est limitée à 30 km/h. L'accent est mis sur les axes routiers présentant une densité de trafic moyenne à forte (par ex. routes communales à partir d'une densité de trafic journalier moyen TJM de 3'000 véhicules jusqu'aux routes cantonales dont le TJM atteint près de 18'000 véhicules). Le comportement de conduite spécifique des camions n'a pas été pris en considération dans le cadre de cette étude. La méthodologie et les résultats détaillés de l'enquête sont décrits dans le rapport G+P AG, « *Statistische Erhebungen zum Fahrverhalten mit Fokus Tempo 30* », Ville de Zurich, Protection de l'environnement et de la santé, 2016 [48].

Une présélection des emplacements se prêtant aux relevés ainsi qu'une inspection ultérieure du terrain avec le concours du département de la mobilité de la Ville de Zurich ont permis de caractériser trois types de zones avec vitesse limitée à 30 km/h ayant une valeur représentative, ainsi qu'une situation de référence où la vitesse signalée est limitée à 50 km/h ; six sections de mesures ont été définies sur ces tronçons. Les quatre types de zones ainsi définis sont décrits ci-dessous et mis en relation avec les sections de mesure correspondantes au **Tableau 8** (pour une caractérisation détaillée des emplacements, voir [48], **Annexe II.1**).

**Zone à 30 km/h étroite** : situation où la limitation de vitesse à 30 km/h est mise en œuvre par des mesures d'accompagnement (par ex. plots, décrochements horizontaux, décrochement verticaux), un aménagement de la zone et des rétrécissements de la chaussée rendant plus difficile le croisement de deux véhicules.

**Zone à 30 km/h dégagée** : situation où la limitation de vitesse à 30 km/h est mise en œuvre par des mesures d'accompagnement et un aménagement n'encombrant pas la zone et permettant généralement le croisement des véhicules.

**Tronçons à 30 km/h** : situation où la vitesse est limitée à 30 km/h sans mesures d'accompagnement ni aménagement de la zone (uniquement signalisation de la vitesse).

**Situation de référence avec limitation de vitesse à 50 km/h** : situation avec vitesse signalée limitée à 50 km/h sur une surface assez étroite et constituant la situation initiale à laquelle se référer pour déterminer l'impact.



**Tableau 8:** Types de zones et sections de mesures où des relevés statistiques sur le comportement de conduite ont été effectués.

Type de zone	Section de mesures
Situation de référence à 50 km/h	1 section de mesures
Tronçon à 30 km/h	1 section de mesures
Zone à 30 km/h dégagée	2 sections de mesures : avec densité moyenne et avec forte densité de trafic
Zone à 30 km/h étroite	2 sections de mesures : à l'emplacement de chaque mesures de modération du trafic et entre les deux

### 2.3.2 Procédure de mesurage

En plus des méthodes de mesurages habituelles, deux nouvelles méthodes d'obtention des données statistiques ont été élaborées et appliquées avec succès dans le cadre de cette étude. Il s'agit d'une part du relevé acoustique du rapport de vitesse, et d'autre part de la statistique d'accélération. Tous deux se fondent sur un processus d'évaluation acoustique et visuel. Ces deux procédés prennent tous deux comme mesure d'évaluation les expériences faites en fonction des différents scénarios lors de la campagne de mesurages pour la détermination de la formule d'émission pour de basses vitesses (voir paragraphe 2.2). Tous les mesurages effectués en parallèle sur chaque section de mesures sont brièvement décrits ci-dessous et réunis dans une vue d'ensemble au **Tableau 9**.

**Mesurages de la vitesse :** Tous les mesurages de la vitesse sont effectués avec un radar Sierzega SR4.

**Mesurages acoustiques :** On procède à l'évaluation acoustique et à l'enregistrement du rapport de vitesse sélectionné pour un passage en conduite constante sans accélération. Cette estimation du rapport de vitesse se fonde sur l'évaluation acoustique de la vitesse de rotation du moteur, selon plusieurs classes correspondant au nombre de tours (nombre de tours très élevé, plutôt élevé, plutôt bas, très bas), et sur la vitesse de conduite. Lorsque les passages sont partiellement ou entièrement effectués avec le moteur découplé (par ex. lors d'une disposition à freiner), on leur attribue généralement un nombre de tours réduit et donc un rapport de vitesse élevé. Lors de relevés tests, l'évaluation du rapport de vitesse sélectionné selon des critères acoustiques a conduit trois ingénieurs différents à tirer des conclusions très similaires. Durant la campagne de mesurages, toutes les évaluations du rapport de vitesse sélectionné ont été effectuées par le même expert, ayant également participé aux relevés tests. On s'est ainsi assuré que l'échelle d'évaluation définie lors des relevés tests était autant que possible garantie pour tous les autres mesurages. Une composante subjective ne peut cependant pas être totalement éliminée.

*Exemple de situation 1 : Une vitesse de 28 km/h a été enregistrée lors du passage d'un véhicule. Lors de ce passage, le bruit du moteur était clairement audible et correspondait à un nombre de tours élevé. L'évaluation du passage situe celui-ci au niveau du 2<sup>e</sup> rapport de vitesse.*

*Exemple de situation 2 : Le passage du véhicule a lieu à 31 km/h. Le bruit du moteur se fait entendre principalement dans les basses fréquences, ce qui correspond à un nombre de tours réduit. Le passage est donc classé dans le 3<sup>e</sup> rapport de vitesse.*

**Statistique d'accélération :** Les véhicules en train d'accélérer ont été évalués en fonction du mode de conduite (avec arrêts, discontinu) et du style d'accélération (prévoyant, sportif, agressif). Lors des mesurages tests, trois ingénieurs ont testé parallèlement et indépendamment l'évaluation du style d'accélération sur les lieux prévus pour les relevés et ont constaté une très bonne concordance entre leurs observations. Comme avec toute méthode qualitative, de légers écarts ne peuvent cependant pas être exclus.

Lors des relevés statistiques, les données concernant le style d'accélération sportif ont fait l'objet d'un relevé séparé, mais pour des raisons pratiques, un tel scénario n'a pas été mis en œuvre à Vauffelin lors de la campagne de mesurages (paragraphe 2.2) pour la détermination de la formule d'émission.

**Comptage du trafic :** Pendant toute la durée de l'enquête statistique, l'ensemble du trafic a été compté (comptage du trafic dans les deux directions). Les voitures de tourisme et les véhicules bruyants ont fait l'objet de comptages séparés.

**Comptage des véhicules présentant des propriétés acoustiques particulières :** Les véhicules présentant des propriétés acoustiques particulières tels que les motos, les voitures de livraison, les camions, les véhicules électriques, etc. ont été indiqués et enregistrés à part afin de faciliter l'interprétation des mesurages acoustiques de courte durée (KZM) effectués simultanément.

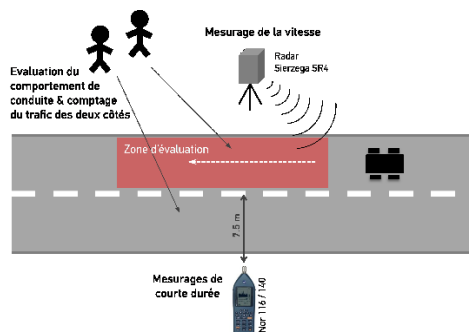
**Mesurages acoustiques de courte durée :** Les mesurages acoustiques de courte durée enregistrent les conditions de propagation du son spécifiques pour un lieu défini. Ils ont été effectués parallèlement aux évaluations acoustiques avec un appareil de mesure Norsonic Nor116 ou Nor140 à une distance de 7.5 m à partir du milieu de la chaussée et à une hauteur de 1.8 m pendant au moins 30 minutes.

**Tableau 9 : Vue d'ensemble des méthodes de collecte des données et des appareils de mesure pour les relevés statistiques sur le comportement de conduite.**

Type d'enquête	Appareils de mesure & méthodes de collecte des données
Mesurages de la vitesse	Avec radar Sierzega SR4
Évaluation acoustique du rapport de vitesse sélectionné	Évaluation acoustique du rapport de vitesse sélectionné fondée sur la perception acoustique du nombre de tours et le mesurage de la vitesse
Statistique sur l'accélération	Caractérisation des véhicules en accélération en fonction du processus d'accélération (a. avec arrêt, b. mode de conduite discontinu) et le mode d'accélération (a. prévoyant, b. sportif, c. agressif)
Mesurage de courte durée	Mesurage de courte durée durant 30 min avec un appareil de mesure Norsonic Nor116 et Nor140 à une distance de 7.5 m du milieu de la chaussée
Comptage du trafic	Comptage de l'ensemble du trafic dans les deux directions
Véhicules présentant des particularités acoustiques	Enquête supplémentaire et identification des véhicules présentant des particularités acoustiques tels que motos, véhicules de livraison, voitures électriques, etc.

### 2.3.3 Déroulement des mesurages

Chaque enquête durait au minimum 30 minutes et se poursuivait jusqu'à ce que la taille de l'échantillon atteigne au moins 100 véhicules. Pour chaque section de recherche, des relevés ont été effectués durant les heures de pointe (6h-8h et 16h-19h), durant les heures creuses (8h-16h et 19h-21h) et pendant la nuit (21h-6h). La **Figure 9** présente un schéma du dispositif de mesurages mis en œuvre pour chaque section de mesurages. Le mesurage de courte durée a été effectué sur tous les sites à 1.8 m au-dessus du sol et à une distance de 7.5 cm de la bande centrale.



**Figure 9 : Schéma du dispositif de mesurages pour chaque section de mesures.**

## 2.4 Détermination de la formule d'émission pour conduite constante

Pour déterminer la formule d'émission pour la conduite constante, on utilise uniquement les niveaux maximaux à une distance de 7.5 m de la source. Tous les symboles et les indices sont explicités dans le glossaire et dans le répertoire des symboles en annexe du rapport.

### 2.4.1 Bruit de roulement

#### Voitures de tourisme (VT)

Pour la plupart des véhicules, le bruit de roulement est relevé par mesurages *Coast-By* durant les mesurages pour la détermination de la formule d'émission dans le domaine des basses vitesses, et ceci avec quatre vitesses différentes comprises entre 20 et 50 km/h. L'émission du bruit de roulement est calculée de manière spectrale comme la valeur moyenne énergétique du niveau sonore mesuré aux positions des microphones 7 et 8 (voir **Figure 6**) par des mesurages *Coast-by* avec moteur arrêté et vitesse constante (voir Éq. 1).

$$L_{\text{Roll:VT,Véh.,f,v}} = 10 \cdot \log \left( \sum_{\text{Mic}=7}^8 \frac{1}{2} 10^{0.1 \cdot L_{\text{Roll:VT,Mic,Véh.,f,v}}} \right) \quad \text{Éq. 1}$$

En se basant sur les émissions du bruit de roulement relevées et les vitesses de passage correspondantes, un modèle logarithmique a été élaboré pour chaque véhicule et fréquence centrale de bande de tierce comprise entre 31.5 et 5'000 Hz.

$$L_{\text{Roll:VT,Fz,f}}(v) = a_{\text{Roll:VT,Fz,f}} + b_{\text{Roll:VT,Fz,f}} \cdot \log(v) \quad \text{Éq. 2}$$

où  $L_{\text{Roll:VT,Fz,f}}(v)$  désigne les émissions de bruit en fonction de la vitesse ( $v$ ) du véhicule ( $Fz$ ) et de la fréquence ( $f$ ), et  $a_{\text{Roll:VT,Fz,f}}$  et  $b_{\text{Roll:VT,Fz,f}}$  les paramètres du modèle qui en sont tributaires, tels qu'ils ont été déterminés.

Les modèles de bruit de roulement  $L_{\text{Roll:VT,Fz,f}}$  avec pente négative  $b_{\text{Roll:VT,Fz,f}}$  se sont révélés erronés ou faussés par des bruits parasites, car ils ont pronostiqué des émissions sonores moindres en cas d'augmentation de la vitesse. Il faut s'attendre à de telles perturbations, en particulier aux fréquences et aux vitesses où le signal se distingue peu du bruit de fond (en cas de mauvais rapport signal-bruit). On l'a identifié dans un second temps en examinant le niveau sonore spectral global relevé durant les mesurages des émissions au moyen des critères a et b suivants :

1. Le bruit global mesuré à une certaine fréquence est inférieur de plus de 1.5 dB au bruit de roulement modélisé

$$L_{\text{Gesamt:VT,Gang,Fz,f,v}} - L_{\text{Roll:VT,Fz,f}}(v) \leq 1.5 \text{ dB} \quad \text{Éq. 3}$$

2. À une certaine fréquence, le modèle de bruit de roulement présente une pente négative

$$b_{\text{Roll:VT,Fz,f}} < 0 \quad \text{Éq. 4}$$

Les modèles de bruit de roulement qui remplissent au moins l'un de ces critères sont déterminés une nouvelle fois selon une procédure en trois temps. Il s'agit d'utiliser une méthode en adéquation avec le niveau de précision auquel prétend cette étude, sans dénaturer le caractère de la formule d'émission propre à chaque véhicule.

1. Dans un premier temps, la flotte de véhicules de la campagne de mesurages (à l'exclusion des véhicules électriques et hybrides) est répartie en trois catégories en fonction de la largeur des pneus (voir **Tableau 10**).

**Tableau 10 : Catégories de pneus pour le réajustement des courbes du bruit de roulement erroné.**

Catégorie de pneus	Largeur des pneus [mm]
Étroit	Jusqu'à 205
Largeur moyenne	206 à 235
Large	236 et plus

On modélise ensuite le bruit de roulement de chaque catégorie de fréquence et de largeur de pneus pour les véhicules présentant des pneus étroits, moyennement larges et larges à partir de l'ensemble des données de mesurages correspondant à chacune de ces catégories.

$$L_{\text{Roll:VT,RKat},f}(v) = a_{\text{Roll:VT,RKat},f} + b_{\text{Roll:VT,RKat},f} \cdot \log(v) \quad \text{Éq. 5}$$

Grâce à l'échantillon élargi obtenu de cette manière, il est possible d'établir des courbes de bruit de roulement relativement robustes, les valeurs aberrantes (c'est-à-dire les cas isolés de mesurages erronés) n'ayant plus qu'une influence négligeable sur le modèle global.

2. Pour les courbes de bruit de roulement qui remplissent un des deux critères, (voir Éq. 3 ou Éq. 4), l'étape suivante consiste à remplacer le paramètre de modèle spécifique au véhicule  $b_{\text{Roll:VT,Fz},f}$  par le paramètre de modèle  $b_{\text{Roll:VT,RKat},f}$  de la catégorie de pneus correspondante.
3. Le paramètre de modèle  $a_{\text{Roll:VT,Fz},f}$  est ensuite recalculé avec le nouveau paramètre de modèle  $b_{\text{Roll:VT,RKat},f}$  et le bruit de roulement est mesuré à 50 km/h. À 50 km/h, le bruit de roulement est prédominant, ce qui permet un rapport signal-bruit plus élevé et une valeur de mesurages plus robuste.

Pour un petit nombre de véhicules, le moteur ne pouvait être ni arrêté ni découplé durant la marche (par ex. véhicules électriques ainsi que deux véhicules hybrides). Pour pouvoir tout de même représenter les émissions sonores de ces véhicules dans la formule d'émission, les émissions globales (y compris la faible proportion de bruit de propulsion) ont été représentées dans le modèle de bruit de roulement, avec un réglage à zéro du modèle de bruit de propulsion inclus.

## Camions

Dans le cadre de cette étude, il n'est pas prévu de constituer une base de données pour la formule du bruit de roulement des camions. Pour pouvoir tout de même estimer ces émissions, on utilise la formule d'émission pour les camions du modèle européen CNOSSOS [23] de l'année 2014. Parmi quatre catégories de véhicules (*light motor vehicles, medium heavy vehicles, heavy vehicles, powered two-wheelers*), on choisit la catégorie *heavy vehicles* qui est considérée comme représentative de la flotte de camions suisse. Cette catégorie comprend les poids-lourds, les bus, les autocars etc. dotés de trois essieux ou plus. Le modèle calcule le bruit de propulsion et le bruit de roulement dans les conditions de référence suivantes : vitesse de conduite constante, tracé routier sans inclinaison, température de l'air de 20°C, chaussée sèche, flotte de véhicules représentative de la moyenne européenne et pneus ne présentant pas de crampons. Le revêtement routier utilisé correspond à une moyenne entre un béton bitumeux dense et un asphalte coulé gravillonné SM 0/11 dont l'âge varie de 2 à 7 ans.

Pour les camions (LKW), le bruit de roulement est calculé comme suit :

$$L_{W,Roll:LKW,fOkt}(v) = a_{Roll:LKW,fOkt} + b_{Roll:LKW,fOkt} \cdot \log \frac{v}{v_{ref}} \quad \text{Éq. 6}$$

où  $L_{W,Roll:LKW,fOkt}(v)$  désigne le niveau de puissance acoustique du bruit de roulement par bande d'octave pour les camions,  $a_{Roll:LKW,fOkt}$  et  $b_{Roll:LKW,fOkt}$  les coefficients de modèle,  $f_{Okt}$  la fréquence centrale de bande d'octave,  $v$  la vitesse de conduite et  $v_{ref}$  la vitesse de référence de 70 km/h. Comme CNOSSOS n'effectue le calcul du bruit de roulement que par bandes d'octave, le niveau d'émission calculé pour les camions a été énergétiquement divisé par trois et indiqué en bandes de tiers d'octave, comme pour la formule d'émission des voitures de tourisme.

En prenant en compte la propagation du son dans la demi-sphère et en négligeant l'atténuation due à l'air, la conversion du niveau de puissance acoustique en niveau de pression acoustique  $L_{Roll:LKW,fOkt}$  à une distance  $r$  de 7.5 m de la source s'effectue de la manière suivante :

$$L_{Roll:LKW,fOkt}(r) = L_{W,Roll:LKW,fOkt} - \left| 10 \cdot \log \frac{2}{4 \cdot \pi \cdot r} \right| \quad \text{Éq. 7}$$

## 2.4.2 Bruit de propulsion

Comme le bruit de propulsion sous la charge du moteur ne peut pas être isolé dans des conditions de plein air, la formule d'émission s'appuie sur le lien entre la somme énergétique des émissions de bruit de roulement et de bruit de propulsion qui donne les émissions du bruit global. Dans le domaine des basses vitesses, les bruits aérodynamiques provenant du châssis du véhicule sont négligeables.

### Voitures de tourisme (VT)

Pour calculer le modèle de bruit de propulsion, on établit d'abord la moyenne énergétique par fréquence de l'ensemble des émissions de bruit enregistrées lors des mesurages des passages à vitesse constante (mesurages *Controlled-by*) aux positions des microphones 7 et 8 (voir **Figure 6**).

$$L_{Gesamt:VT,Fz,Gang,f,v} = 10 \cdot \log \left( \sum_{Mic=7}^8 \frac{1}{2} 10^{0.1 \cdot L_{Gesamt:VT,Mic,Fz,Gang,f,v}} \right) \quad \text{Éq. 8}$$

où  $L_{Gesamt:VT,Fz,Gang,f,v}$  représente le niveau sonore au passage en fonction de la vitesse ( $v$ ), du véhicule ( $Fz$ ), du rapport de vitesse et de la fréquence ( $f$ ).

À l'aide du modèle de bruit de roulement spécifique pour chaque véhicule et chaque fréquence, on calcule ensuite l'émission de bruit de roulement pour  $v_{Gesamt}$ , c'est-à-dire pour la vitesse de conduite durant le mesurage du bruit global. Le niveau de bruit de propulsion correspondant à la vitesse de conduite  $v_{Gesamt}$  peut être déterminé par soustraction énergétique de l'émission du bruit global mesurée et de l'émission de bruit de roulement calculée. De cette manière, il est possible de calculer pour chaque mesurage du bruit global l'émission de bruit de propulsion correspondante par fréquence.

Une fois déterminées, les émissions spectrales de bruit de propulsion permettent dans un second temps de calculer des modèles de bruit de propulsion spécifiques pour chaque rapport de vitesse en mettant en relation vitesse rapport de vitesse niveau sonore. La relation vitesse rapport de vitesse niveau sonore appliquée découle, d'une part de la relation proportionnelle entre le rapport de vitesse et la vitesse, et d'autre part d'une constante de vitesse tributaire du rapport de vitesse déterminée de manière expérimentale.

Il en résulte la relation suivante :

$$DZ_{Fz,f,Gang}(v) = \frac{900}{9 + c_{Antr:Gang}} \cdot v \quad \text{Éq. 9}$$

où  $DZ_{Fz,f,Gang}(v)$  désigne le nombre de tours,  $v$  la vitesse et  $c_{Antr:Gang}$  une constante de vitesse tributaire du rapport de vitesse (voir **Annexe I.2**). Le dénominateur correspond à la vitesse pour un nombre de tours minimum défini de 900 U/min.

Pour le calcul du modèle de bruit de propulsion, il s'ensuit donc que :

$$L_{Antr:VT,Fz,f,Gang}(v) = a_{Antr:VT,Fz,f,Gang} + b_{Antr:VT,Fz,f,Gang} \cdot \log(DZ_{Fz,f,Gang}(v)) \quad \text{Éq. 10}$$

En substituant le nombre de tours  $DZ_{Fz,f,Gang}(v)$  dans l'Éq. 10 à l'aide de l'Éq. 9, on obtient une relation fonctionnelle entre le niveau d'émission et la vitesse

$$L_{Antr:VT,Fz,f,Gang}(v) = a_{Antr:VT,Fz,f,Gang} + b_{Antr:VT,Fz,f,Gang} \cdot \log\left(\frac{900}{9 + c_{Antr:Gang}} \cdot v\right) \quad \text{Éq. 11}$$

où  $L_{Antr:VT,Fz,f,Gang}(v)$  désigne l'émission de bruit de propulsion spécifique pour la fréquence et le véhicule,  $a_{Antr:VT,Fz,f,Gang}$ ,  $b_{Antr:VT,Fz,f,Gang}$  et  $c_{Antr:Gang}$  les coefficients de modèle et  $v$  la vitesse.

Selon les indications de l'industrie automobile, la vibration de corps métalliques (carter d'huile, parties du capot du moteur) produit dans le domaine des basses fréquences des émissions de bruit qui, à leur propre fréquence, ne sont pratiquement pas tributaires de la vitesse et du nombre de tours [49]. Par conséquent, les émissions de bruit sont plus ou moins constantes pour des fréquences inférieures à 125 Hz. Pour les modèles de bruit de propulsion qui présentent ce type de comportement, on décide que  $b_{Antr:Fz,f}$  est égal à zéro (cf. Éq. 12). Il en résulte pour certaines fréquences des émissions de bruit de propulsion constantes.

$$b_{Antr:VT,Fz,f,Gang} = 0 \quad \text{Éq. 12}$$

Les bruits de propulsion des véhicules électriques mesurés égalent zéro.

## Camions

Dans le cadre de cette étude, il n'a pas été prévu de constituer une base de données pour la formule d'émission du bruit de propulsion des camions. Pour pouvoir tout de même estimer celui-ci, on a utilisé la formule d'émission pour les camions du modèle européen CNOSSOS [23] datant de 2014. Comme pour le bruit de roulement, le bruit de propulsion pour les camions est dérivé du modèle d'émission (cf. paragraphe **2.4.1**). L'équation 13 montre la formule d'émission de base pour le niveau de puissance acoustique

$$L_{W,Antr:LKW,fOkt}(v) = a_{Antr:LKW,fOkt} + b_{Antr:LKW,fOkt} \cdot \frac{(v - v_{ref})}{v_{ref}} + C_{KorrCNOSSOS} \quad \text{Éq. 13}$$

où  $L_{W,Antr:LKW,fOkt}$  désigne l'émission de bruit de propulsion par bande d'octave,  $a_{Antr:LKW,fOkt}$  et  $b_{Antr:LKW,fOkt}$  les coefficients de modèle spectraux,  $C_{KorrCNOSSOS}$  le terme de correction constant pour la sous-estimation du bruit de propulsion par CNOSSOS,  $v$  la vitesse de conduite et  $v_{ref}$  la vitesse de référence de 70 km/h. Comme CNOSSOS n'effectue le calcul du bruit de roulement que par bandes d'octave, les niveaux d'émission calculés pour les camions sont divisés énergétiquement par trois et indiqués en bandes de tiers d'octave, de la même manière que pour la détermination du bruit de roulement des camions (voir paragraphe **2.4.1**). Pour convertir le niveau de puissance acoustique indiqué dans le modèle CNOSSOS ( $L_{W,Antr:LKW}$ ) en niveau de pression acous-

tique ( $L_{Antr:LKW}$ ), on a supposé une propagation du son dans la demi-sphère en négligeant l'atténuation due à l'air et on l'a recalculé à une distance  $r$  de 7.5 m de la source :

$$L_{Antr:LKW}(r) = L_{W,Antr:LKW} - \left| 10 \cdot \log \frac{2}{4 \cdot \pi \cdot r} \right| \quad \text{Éq. 14}$$

La flotte de véhicules majoritaires pour les camions peut présenter de fortes différences régionales en ce qui concerne la taille, le type et le degré de modernisation ; ce qui a un impact déterminant sur les émissions sonores. Pour garantir que les calculs d'émission avec CNOSSOS soient représentatifs de la flotte de véhicules suisse, les pronostics du modèle sont égalisés avec un grand nombre de mesurages statistiques de passages réels. L'équilibrage se fonde sur 431 mesurages effectués depuis 2010 avec la méthode SPB (*statistical pass-by*) et attribués à la catégorie des camions. Seuls ont été exploités des mesurages effectués à une vitesse signalisée de 50 km/h sur des revêtements acoustiquement neutres. L'équilibrage a révélé une légère sous-estimation de 0.6 dB par CNOSSOS, due principalement à un écart dans la distribution statistique des camions circulant à l'intérieur des localités en comparaison avec la catégorie des *heavy vehicles* de CNOSSOS. On présume que cette différence provient en particulier d'un écart du bruit de propulsion, car les tendances constatées jusqu'ici en matière d'émissions des camions résultaient principalement d'un changement du bruit de propulsion. C'est pourquoi le modèle de bruit de propulsion pour les camions fourni par CNOSSOS a été complété par un terme de correction  $C_{KorrCNOSSOS} = 0.8$  (voir Éq. 14), qui corrige la sous-estimation de 0.6 dB de CNOSSOS par rapport à StL86+.

## 2.5 Détermination de la formule d'émission pour la conduite en phase d'accélération

Pour déterminer la formule d'émission en phase d'accélération, on utilise exclusivement les niveaux maximaux à une distance de 7.5 m de la source. Tous les symboles et indices sont expliqués dans le glossaire et la liste des symboles est en annexe.

### Voitures de tourisme (VT)

Lors de la campagne de mesurages, les émissions en phase d'accélération ont pu être relevées par des mesurages *Acceleration pass-by* pour l'ensemble de la flotte de véhicules. Comme les émissions de bruit lors de l'accélération sont déterminées par les processus de changement de rapport de vitesse et les particularités de conduite, les émissions globales sont calculées comme la moyenne énergétique de la somme des niveaux des dix positions des microphones:

$$L_{\text{Beschl: VT, Fz}}(v) = 10 \cdot \log \left( \sum_{\text{Mic}=1}^{10} \sum_{f=31.5\text{Hz}}^{5000\text{Hz}} \frac{1}{n_{\text{Mic}} \cdot n_f} 10^{0.1 \cdot L_{\text{Beschl: VT, Fz, Mic, f}}(v)} \right) \quad \text{Éq. 15}$$

où  $L_{\text{Beschl: VT, Fz}}$  désigne la moyenne énergétique du niveau sonore au passage de chaque véhicule,  $\text{Mic}$  la position du microphone (cf. **Figure 6**),  $f$  la fréquence moyenne de bande de tiers d'octave,  $n_{\text{Mic}}$  le nombre de positions des microphones 1 à 10,  $n_f$  le nombre de fréquences moyennes de bande de tiers d'octave. Dans un souci de simplification, la formule d'émission pour la conduite accélérée ne dépend pas du revêtement.

### Camions

Dans le cadre de cette étude, il n'a pas été prévu de constituer une base de données pour la formule d'émission concernant la conduite accélérée des camions. Le modèle d'émission européen CNOSSOS ne prend en compte les émissions de bruit des camions dues à l'accélération que lors de carrefours et de giratoires au moyen d'un paramètre de distance. Cette approche n'est pas adaptée à la formule d'émission présentée ici. Celle-ci ne prend donc pas en compte l'accélération des camions.



## 2.6 Détermination des formules sources

En se fondant sur les formules d'émission pour la conduite constante et la conduite en phase d'accélération ainsi que sur le comportement de conduite statistique, on peut déterminer les formules sources en trois étapes. Les formules sources constituent la base de la détermination de l'impact acoustique dans les situations à basses vitesses.

1. En fonction des différentes périodes du cycle journalier, on pondère le comportement de conduite statistique relevé dans des situations réelles (distribution de la vitesse typique pour une certaine zone et rapport de vitesse statistique pour les types de zones avec limitation de vitesse à 30 km/h, en se référant à une situation avec limitation de vitesse à 50 km/h) et on le représente dans les modèles de bruit de roulement et de propulsion à l'aide de la relation vitesse-rapport de vitesse. La conduite en phase d'accélération est prise en compte séparément dans le modèle d'accélération. La base est fournie par la statistique du comportement de conduite du paragraphe 2.3 et les formules d'émission spécifiques selon les véhicules des paragraphes 2.4 et 2.5. Pour les camions, on ne considère que la distribution de la vitesse.

2. Les bruits de roulement et de propulsion déterminés à l'étape 1 sont joints dans la formule d'émission pour conduite constante en prenant en compte le revêtement cible. Puis on convertit les niveaux maximaux spécifiques à chaque véhicule qui résultent des formules d'émission pour la conduite constante, la conduite en phase d'accélération et les camions en un niveau de pression acoustique continu équivalent et indépendant de la vitesse.

3. Les émissions spécifiques à chaque véhicule sont rassemblées en classes de véhicules et pondérées avec la statistique de la flotte de voitures suisse (statistique des véhicules autorisés en Suisse [51], [52]).

Pour les trois types de zones (tronçons à 30 km/h, zones à 30 km/h dégagées, zones à 30 km/h étroites), trois formules sources distinctes sont constituées et identifiées. Les différentes étapes menant aux formules sources sont représentées à la **Figure 10** et expliquées ci-dessous.

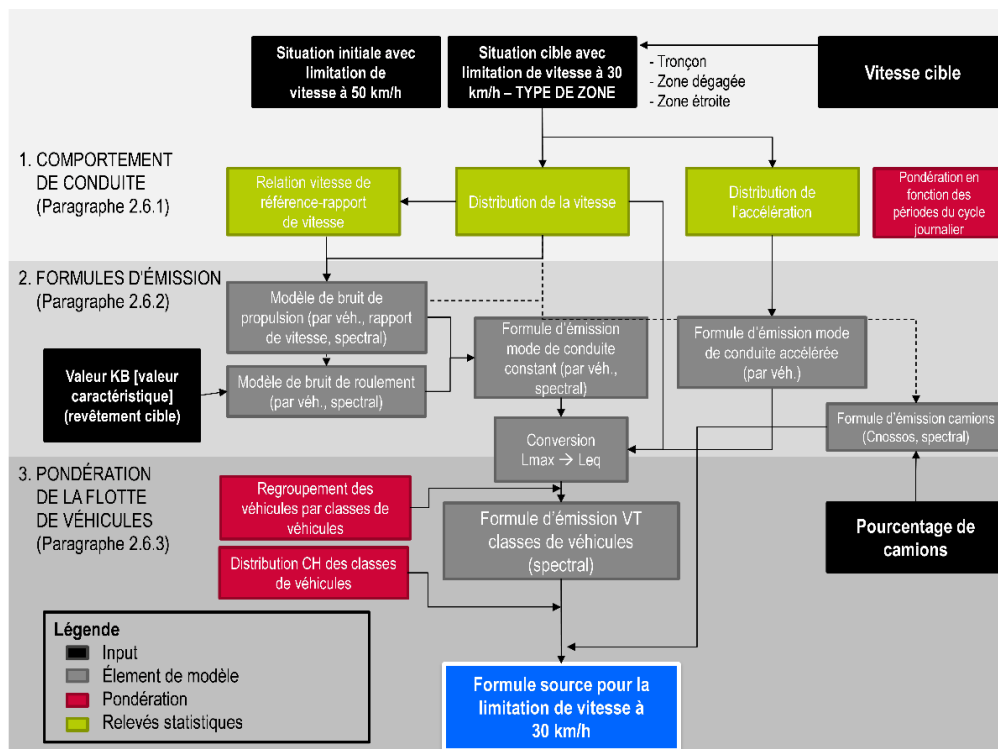


Figure 10 : Diagramme de flux des étapes du processus menant aux formules sources.

## 2.6.1 Représentation du comportement de conduite

L'élément central des formules sources est la représentation du comportement de conduite dominant à de basses vitesses à partir des relevés statistiques. Les relevés statistiques correspondant aux trois périodes du cycle journalier (journée, heures de pointe, nuit) ont été proportionnellement réduits à des valeurs moyennes journalières.

**Distribution de la vitesse.** La distribution de la vitesse déterminée durant les relevés statistiques constitue le principal élément du calcul des émissions avec des modèles de bruit de roulement et de propulsion pour la conduite constante, et elle est indiquée pour chaque type de zone. Dans la situation cible, pour les statistiques de vitesse spécifiques aux trois zones, on a supposé, de manière approximative, des distributions normales dont le sommet se situe à la vitesse moyenne mesurée ( $v_{Q50}$ ). De même, pour les statistiques de vitesse de la situation de référence avec limitation de vitesse à 50 km/h, on a supposé une répartition normale, mais dont le sommet se situe à une vitesse moyenne ( $v_{Q50}$ ) de 50 km/h, afin de représenter la situation initiale. Les distributions de vitesse ne se distinguent pas entre les VT et les camions et sont utilisées pour les formules d'émission de toutes les catégories de VT et de camions.

**Relation vitesse-rapport de vitesse.** Avec la distribution de la vitesse, la relation vitesse-rapport de vitesse constitue la base du calcul du bruit de propulsion ; elle est déterminée pour l'ensemble des données statistiques relevées et non de manière spécifique selon chaque zone. La distribution de la vitesse propre à chaque zone permet d'en donner une représentation différenciée. Lors du calcul du bruit de propulsion, les véhicules circulant à une certaine vitesse sont pondérés en fonction de leur proportion prédéterminée par la distribution du rapport de vitesse. La vitesse est discrétisée pour obtenir des nombres entiers entre 1 et 60 km/h. La relation vitesse-rapport de vitesse est utilisée pour le calcul de la formule d'émission des VT.

**Répartition de l'accélération.** La statistique de la conduite accélérée est utilisée pour calculer les émissions des véhicules lors de l'accélération ; une distinction est faite entre l'accélération en marche (discontinuité dans la conduite du véhicule) et l'accélération après un arrêt. On différencie également les styles d'accélération : *prévoyant*, *sportif* et *agressif*. Des nécessités liées à la technique de relevés ont conduit à ne représenter que les styles d'accélération *prévoyant* et *agressif* dans le modèle d'accélération ; les accélérations de type *sportif* étant imputées au style *prévoyant* ou *agressif* avec la pondération suivante : La pondération a été déterminée de manière à ce que, du fait de l'attribution du style d'accélération *sportif* à l'une ou l'autre catégorie, ses émissions soient inférieures de 3 dB (conduite discontinue) ou de 2 dB (accélération après un arrêt) à celles du style d'accélération *agressif*. La distribution de l'accélération est utilisée pour calculer la formule d'émission des VT.

Dans le cadre de la présente étude, aucun relevé séparé n'a été effectué concernant le comportement de conduite des camions pour les basses vitesses. Pour représenter celui-ci, on utilise la distribution de la vitesse statistique typique pour chaque zone, indépendamment du rapport de vitesse.

## 2.6.2 Prise en compte de l'influence du revêtement, fusion dans la formule d'émission & conversion en $Leq$

### Prise en compte du revêtement routier

Pour pouvoir prendre en compte l'impact acoustique des différents revêtements routiers dans la formule d'émission, on a mesuré les qualités acoustiques des revêtements avec la procédure CPX (voir paragraphe 2.2.3) sur la piste d'essai du DTC à Vauffelin. Grâce au bruit de roulement spectral qui y a été déterminé pour le revêtement initial, la formule d'émission pour les voitures de tourisme peut s'appliquer à d'autres revêtements. Pour les camions, on applique une procédure similaire, mais en partant du revêtement standard de CNOSSOS. Comme la documentation de CNOSSOS décrit ce revêtement sans en donner une caractérisation spectrale, on détermine une signature spectrale corres-

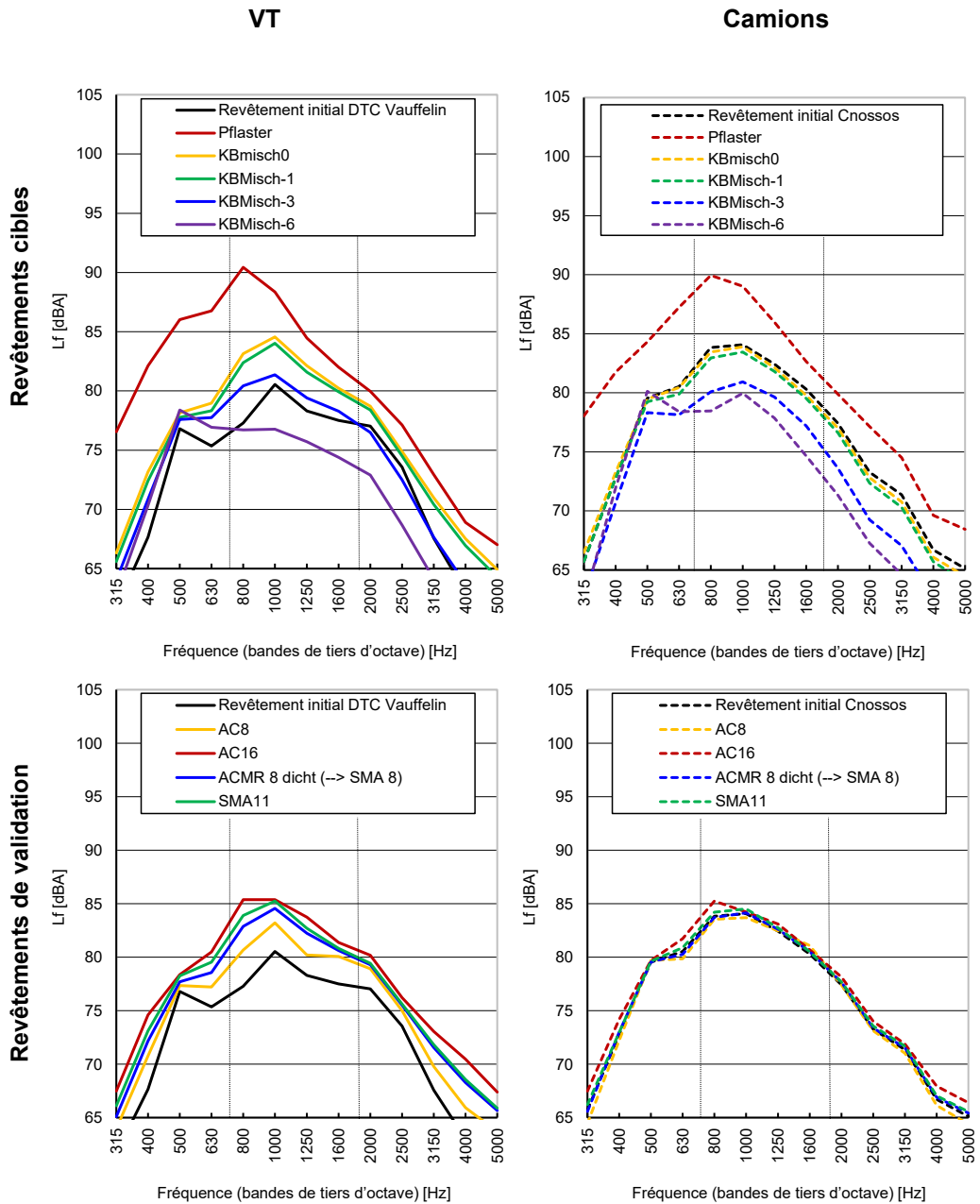
pondant à sa composition dans la base de données de Grolimund + Partner AG pour les mesurages CPX.

Pour déterminer les effets acoustiques de la limitation de vitesse à 30 km/h sur les revêtements peu bruyants et sur les pavés, on détermine pour le revêtement cible une différence spectrale par rapport au revêtement initial avec limitation à 50 km/h et on l'additionne au bruit de roulement (voir Éq. 16 et Éq. 17).

$$L_{\text{Roll,korrBelag:VT,Fz,f}}(v) = L_{\text{Roll:VT,Fz,f}}(v) + k_{\text{Vauffelin,f}} \quad \text{Éq. 16}$$

$$L_{\text{Roll,korrBelag:LKW,fOkt}}(v) = L_{\text{Roll:LKW,fOkt}}(v) + k_{\text{CNOSSOS,fOkt}} \quad \text{Éq. 17}$$

où  $L_{\text{Roll,korrBelag:VT,Fz,f}}(v)$  et  $L_{\text{Roll,korrBelag:LKW,fOkt}}(v)$  désignent le bruit de roulement corrigé en fonction du revêtement pour les VT et les camions,  $L_{\text{Roll:VT,Fz,f}}(v)$  et  $L_{\text{Roll:LKW,fOkt}}(v)$  les niveaux de bruit de roulement initiaux non corrigés en fonction du revêtement, et  $k_{\text{Vauffelin,f}}$  et  $k_{\text{CNOSSOS,fOkt}}$  les termes de correction spécifiques selon les fréquences. Dans un souci de simplification, on admet que cette différence spectrale reste constante indépendamment de la vitesse. On a procédé de la même façon avec la différence spectrale par rapport aux revêtements de validation (revêtements présents sur les tronçons de validation, voir **Annexe II.1**). La **Figure 11** décrit les spectres de bruit de roulement de tous les revêtements utilisés dans cette étude. Le **Tableau 11** montre la différence en dB des revêtements de référence du DTC Vauffelin et de CNOSSOS, compte-tenu du facteur de conversion de l'effet du revêtement dans la zone proximale (mesurages CPX), par rapport à des mesurages de passage (par exemple mesurages SPB) [17].



**Figure 11 :** Signatures spectrales du revêtement cible et du revêtement de validation comparées aux revêtements initiaux (pour les VT, revêtement sur la piste d'essai de Vauffelin ; pour les camions, revêtement dans CNOSSOS).

**Tableau 11 : Différences acoustiques entre les revêtements utilisés et le revêtement initial correspondant (DTC Vauffelin pour les VT et CNOSSOS pour les camions).**

Revêtement	Différence acoustique par rapport au revêtement de référence [dB]												
	315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz	2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz
<b>Revêtements cibles</b>													
Pavage	18.5	18.0	11.5	14.2	16.4	9.8	7.7	5.6	3.7	4.4	6.7	7.3	7.6
KBMisch0	5.8	6.9	1.7	4.5	7.3	5.0	4.8	3.4	2.1	1.7	4.3	5.6	5.0
KBMisch-1	4.9	5.9	1.2	3.7	6.4	4.3	4.1	3.0	1.7	1.2	3.6	4.9	4.2
KBMisch-3	2.9	4.0	1.0	3.0	3.9	1.0	1.4	1.0	-0.7	-1.3	0.1	0.9	0.1
KBMisch-6	1.4	3.3	2.0	2.0	-0.7	-4.7	-3.2	-3.9	-5.2	-6.1	-4.3	-3.6	-4.6
<b>Revêtements de validation</b>													
AC 8	2.9	3.9	0.7	2.3	4.2	3.3	2.4	3.2	2.3	1.8	2.8	3.6	3.5
AC 16	7.2	8.7	2.0	6.4	10.1	6.0	6.8	4.8	3.9	3.3	6.9	9.3	8.1
SMA 8	4.3	5.6	1.1	4.0	7.0	5.0	4.9	3.9	2.8	2.4	5.0	6.6	5.9
SMA 11	5.5	6.8	1.8	5.2	8.2	5.9	5.5	4.1	3.0	2.6	5.3	6.9	6.2
<b>Revêtements cibles</b>													
KBMisch0	1.0	0.5	-0.1	-0.1	-0.4	-0.2	-0.3	-0.5	-0.4	-0.5	-0.6	-0.6	-0.7
KBMisch-1	0.0	0.0	-0.4	-0.9	-1.2	-0.8	-0.9	-1.1	-1.1	-1.3	-1.4	-1.4	-1.6
KBMisch-3	-3.9	-2.9	-1.7	-3.2	-5.1	-4.3	-3.8	-4.2	-5.2	-5.5	-5.8	-5.4	-6.0
KBMisch-6	-4.6	-1.1	0.8	-2.9	-7.3	-5.6	-6.2	-7.7	-8.3	-8.2	-9.2	-8.5	-9.9
<b>Revêtements de validation</b>													
AC 8	-1.7	-0.8	0.2	-0.9	-0.4	-0.5	0.0	1.1	0.0	-0.2	-0.5	-0.7	-1.0
AC 16	2.4	1.9	0.2	1.6	1.9	0.2	0.9	0.5	1.0	1.0	0.7	1.7	1.7
SMA 8	-0.2	0.3	0.0	-0.4	-0.2	0.1	0.2	0.3	0.3	0.1	0.2	0.3	0.4
SMA 11	0.7	0.2	0.1	0.5	0.5	0.6	0.4	0.3	0.4	0.4	0.5	0.4	0.6

On constate sur la **Figure 11** que le revêtement AC11 de la piste d'essai de Vauffelin est extrêmement peu bruyant, comme on l'observe souvent sur les pistes d'essai, celles-ci ne subissant guère de contraintes mécaniques. Le revêtement de Vauffelin n'est donc pas représentatif des revêtements du même type du réseau routier public et doit être corrigé en conséquence.

### Fusion de la formule d'émission

Les modélisations du bruit de roulement et du bruit de propulsion sont fusionnées dans la formule d'émission pour la conduite constante.

### Conversion du Lmax en Leq

Les formules d'émission pour la conduite constante, la conduite accélérée et les camions se fondent entièrement sur les niveaux maximaux et sont converties en niveau de pression acoustique continu équivalent  $Leq_{1Fz/h,A}$  à l'aide d'une équation publiée par l'EMPA (Éq. 18) [53] et tenant compte de la répartition de la vitesse.

$$Leq_{1Fz/h,A} = L_{max,7.5m,A} - 10 \cdot \log(v) - 10 \cdot \log(d) - 7.5 \quad \text{Éq. 18}$$

où  $L_{max,7.5m,A}$  représente le niveau sonore maximum de passage pondéré selon A à une distance de 7.5 m [dB(A)],  $v$  la vitesse du véhicule [km/h] et  $d$  la distance entre le point récepteur et la chaussée [m]. Le niveau maximum et le niveau acoustique continu équivalent peuvent ainsi être indiqués tous les deux dans les formules sources.

## 2.6.3 Pondération de la flotte des voitures de tourisme

Un des buts principaux de cette étude est la représentation d'une formule d'émission pour une flotte de voitures de tourisme moderne et représentative. À cet effet, on a additionné les immatriculations de voitures de tourisme entre 2001 et 2014 en Suisse selon la

capacité de leurs cylindrées et on a indiqué la proportion (voir **Tableau 12**). La proportion de voitures de livraison de moins de 3.5 t se fonde sur le pourcentage déterminé durant les relevés statistiques parmi tous les mesurages.

**Tableau 12 : Flotte des voitures de tourisme pour les formules sources selon classe de cylindrée et pourcentage de la flotte des véhicules national CH.**

Classe de cylindrée	Classe de véhicule	Proportion [%]
1000 - 1399	Petite voiture*	24.4
1400 - 1799	Voiture compacte**	23.4
1800 - 1999	Voiture de classe moyenne*	27.5
2000 - 2499	Voiture de luxe / Minibus / Monospace	9.1
2500 - 2999	SUV / Fourgon aménagé	7.6
3000 et plus	Voiture de sport / Voiture tout-terrain **	4.9
Non défini	Voiture de livraison < 3.5t	3.1

\* comprend les véhicules électriques

\*\* comprend les véhicules hybrides

Les véhicules dont les données ont été relevées dans le cadre de cette étude sont classés en fonction de la capacité de leurs cylindrées selon l'**Annexe II.3** ainsi que des pneus correspondants. La campagne de mesurages ayant été conduite fin avril, les véhicules sont munis de pneus d'été ou d'hiver (voir **Tableau 4** en annexe). Si une modification de la flotte des véhicules devait être constatée à l'avenir, les classes de véhicules pourraient être adaptées pour tenir compte d'une telle tendance.

## 2.7 Mise en œuvre de la validation

Afin de constituer une base de données de validation, des mesurages du bruit ont été réalisés à proximité des émissions simultanément aux relevés statistiques pendant au moins 30 minutes. La base de données de validation permet une comparaison directe des pronostics du modèle avec le niveau sonore enregistré sur place. Il faut toutefois prendre en compte le fait que les mesurages du bruit effectués pendant les relevés statistiques ne sont pas surveillés, et donc qu'il n'y a pas de contrôle des bruits parasites. Comme les mesurages ont eu lieu dans des secteurs urbains à forte densité (en ville de Zurich et à Köniz), il faut s'attendre à une certaine influence non quantifiable sur le niveau sonore mesuré. Les pronostics de modèle utilisés pour la validation se fondent sur le nombre de véhicules comptés (comprenant une proportion de camions) et sur des informations concernant le revêtement. On ne disposait pas de valeurs concernant la qualité du revêtement relevées in-situ.

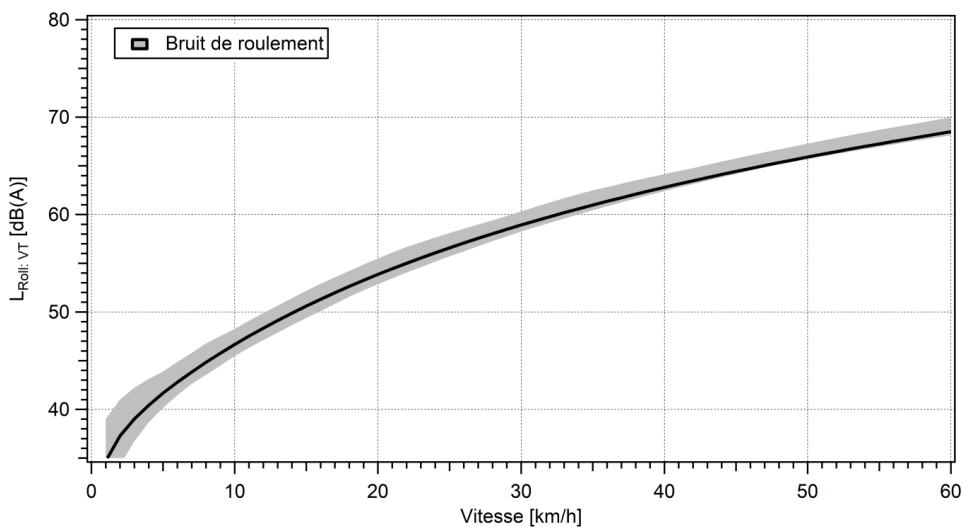
## 3 Résultats

### 3.1 Formules d'émission

Les bilans présentés au paragraphe 3.1 se fondent sur les résultats des mesurages effectués sur la piste d'essai du DTC à Vauffelin (BE) afin de collecter les données pour la détermination des formules d'émission pour le domaine des basses vitesses. Il faut noter que les résultats présentés dans ce chapitre s'appliquent au revêtement en place sur la piste d'essai. Pour les transposer au cas d'un revêtement différent, il convient de compenser les différences acoustiques spectrales entre le revêtement cible et le revêtement initial (piste d'essai de Vauffelin) (voir paragraphe 2.6.2) avec le bruit de roulement des formules d'émission.

#### 3.1.1 Bruit de roulement

Les modèles de bruit de roulement pour les VT résultent des mesurages de bruit de roulement à différentes vitesses durant la campagne de mesurage pour la détermination des formules d'émission en ce qui concerne les vitesses basses. Les coefficients du modèle et la description des modèles de bruit de roulement pour les échantillons et les fréquences de chaque véhicule de la flotte sont indiqués aux **Annexes 1.4 et I.1**. La **Figure 12** permet de visualiser le modèle de bruit de roulement moyen (moyenne arithmétique de l'ensemble des échantillons examinés) sur le revêtement de la piste d'essai de Vauffelin (BE), et également l'écart interquartile (dispersion) représenté sous forme de bande.



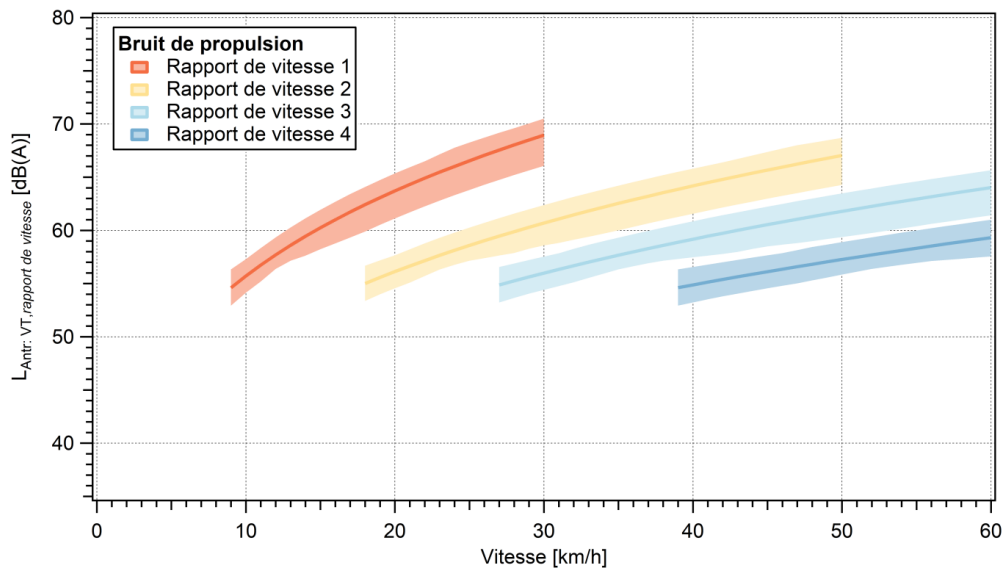
**Figure 12 :** Moyenne arithmétique du modèle de bruit de roulement sur le revêtement routier du circuit d'essai à une distance de 7.5m de la source et dispersion (écart interquartile) de l'échantillon des véhicules examinés.

On voit sur la **Figure 12** que l'augmentation du bruit de roulement pour chaque dizaine de vitesse est plus nette pour les basses vitesses que pour les hautes vitesses (par ex. dès 40 km/h). Le bruit de roulement est en outre plus dispersé. Entre 20 et 50 km/h, la dispersion du bruit de roulement de la flotte des véhicules examinés se situe entre 2 et 3 dB.

Les résultats de la campagne de mesurage effectuée en parallèle sur l'influence des différentes propriétés des pneus montrent que le type de pneu (été ou hiver), l'étiquette sur l'acoustique du pneu (catégorie d'émission sonore) et la largeur du pneu peuvent avoir une influence déterminante sur les émissions de bruit de roulement. Les résultats sont décrits à l'Annexe III. Dans le présent projet, ces différences ont été indirectement prises en compte par le biais de la pondération de la flotte de véhicules.

### 3.1.2 Bruit de propulsion

Comme décrit au paragraphe 2.4.2, les modèles de bruit de propulsion pour les VT ont été calculés à partir des mesurages du bruit de roulement et du bruit global effectués durant la campagne de mesurage pour la détermination des formules d'émission pour les basses vitesses. Les coefficients de modèle et la description des modèles de propulsion pour chaque véhicule, rapport de vitesse et fréquence, sont indiqués dans les **Annexes I.4 et I.2**. La **Figure 13** permet de visualiser le modèle de bruit de propulsion moyen en fonction du rapport de vitesse (moyenne arithmétique) et donne une caractérisation de la dispersion avec l'écart interquartile.



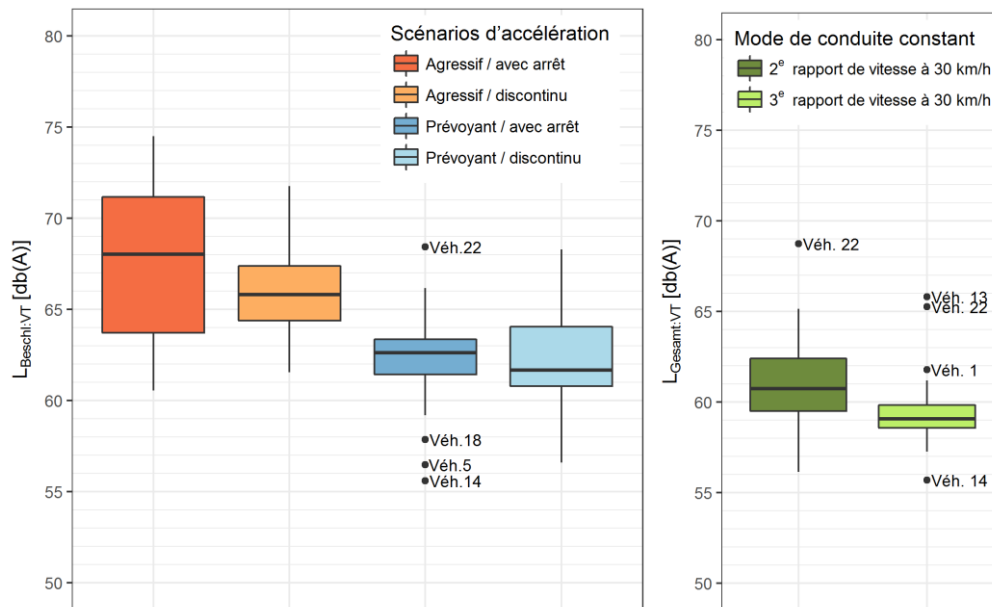
**Figure 13** : Modèle de bruit de propulsion moyen selon le rapport de vitesse à une distance de 7.5 m de la source et dispersion (écart interquartile) de la flotte des véhicules examinée.

La **Figure 13** montre que le bruit de propulsion diffère nettement en fonction du rapport de vitesse sélectionné. Il faut toutefois noter que chaque rapport de vitesse n'est utilisé que dans un domaine de vitesse restreint. Si le bruit de roulement moyen à 30 km/h est de 58.5 dB, il apparaît clairement que le bruit de propulsion en 3<sup>ème</sup> rapport de vitesse se situe nettement plus bas. Avec un 2<sup>ème</sup> rapport de vitesse, le bruit de propulsion se situe légèrement au-dessus du bruit de roulement moyen. Lors de la conduite en 1<sup>er</sup> rapport de vitesse, le bruit de propulsion est clairement dominant.



### 3.1.3 Accélération

Le comportement d'accélération a été décrit à l'aide de plusieurs scénarios d'accélération typiques qui tiennent compte à la fois du mode de conduite et du style d'accélération. Les diagrammes de la **Figure 14** décrivent les distributions statistiques des niveaux sonores mesurés pour les quatre scénarios d'accélération et, à titre de comparaison, avec une conduite constante en 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> rapports de vitesse.



**Figure 14 :** Distribution statistique (diagrammes en boîte) du bruit global mesuré sur le circuit d'essai pour chaque scénario d'accélération ( $L_{Beschl:VT}$ ), catégorisé selon le comportement de conduite prédéterminé, en comparaison avec le bruit global d'une conduite constante en 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> rapport de vitesse ( $L_{Gesamt:VT}$ ).

On constate que la conduite et le style d'accélération ont une influence déterminante sur le niveau sonore. Une conduite agressive après un arrêt présente le niveau sonore moyen le plus élevé (68.0 dB(A)) et une conduite prévoyante et discontinue (sans arrêt), le niveau sonore moyen le plus bas (61.7 dB(A)). En comparaison, les niveaux sonores moyens mesurés à conduite constante en 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> rapports de vitesse à 30 km/h se situent à 60.8 dB(A) et 59.1 dB(A), et donc légèrement en-dessous du niveau sonore du scénario d'une accélération prévoyante.

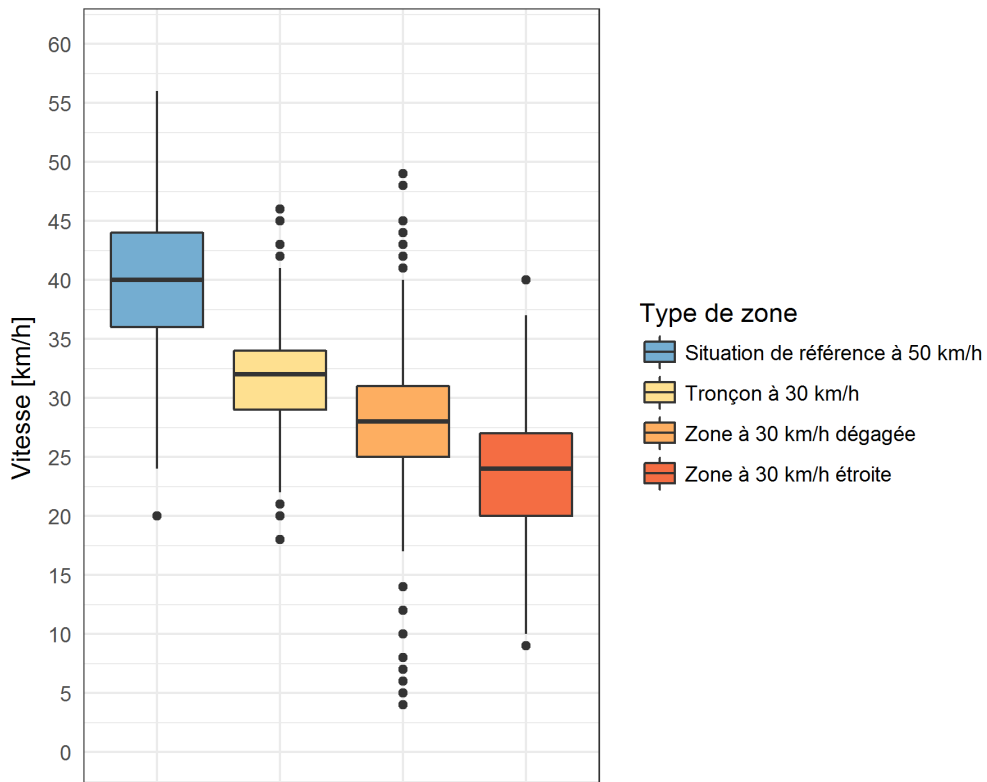
**Tableau 13 :** Valeurs caractéristiques de la distribution statistique du bruit global mesurées sur le circuit ( $L_{Beschl:VT}$ ) lors de l'accélération en comparaison avec le bruit global d'une conduite constante en 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> rapport de vitesse ( $L_{Gesamt:VT}$ ).

Scénario	Paramètre du modèle	Médiane [dB(A)]	Écart type [dB(A)]	Q(0.25) [dB(A)]	Q(0.75) [dB(A)]
Agressif/avec arrêt	$L_{Beschl:VT}$	68.0	4.3	63.7	71.2
Agressif/discontinu	$L_{Beschl:VT}$	65.8	2.6	64.4	67.4
Prévoyant/avec arrêt	$L_{Beschl:VT}$	62.6	3.0	61.4	63.4
Prévoyant/discontinu	$L_{Beschl:VT}$	61.7	2.7	60.8	64.1
2 <sup>e</sup> rapport de vitesse à 30 km/h	$L_{Gesamt:VT}$	60.8	2.8	59.5	62.4
3 <sup>e</sup> rapport de vitesse à 30 km/h	$L_{Gesamt:VT}$	59.1	2.3	58.6	59.8

## 3.2 Statistique sur le comportement de conduite

### 3.2.1 Distribution de la vitesse

Les vitesses effectives mesurées durant les relevés statistiques sur le comportement de conduite permettent de déduire une distribution de la vitesse en fonction du type de zone. Les distributions pour la situation de référence et les trois types de zones où la vitesse est limitée à 30 km/h sont représentées à la **Figure 15** par des diagrammes. Les valeurs statistiques caractéristiques de la distribution de la vitesse (valeur moyenne,  $v_{Q50}$ ,  $v_{Q85}$ ,  $n$ ) sont présentées au **Tableau 14**. On renonce à une analyse en fonction des périodes de la journée, car aucune différence significative n'a pu être constatée entre elles (voir [48]).



**Figure 15 :** Diagrammes en boîte de la vitesse de conduite effective par type de zone.

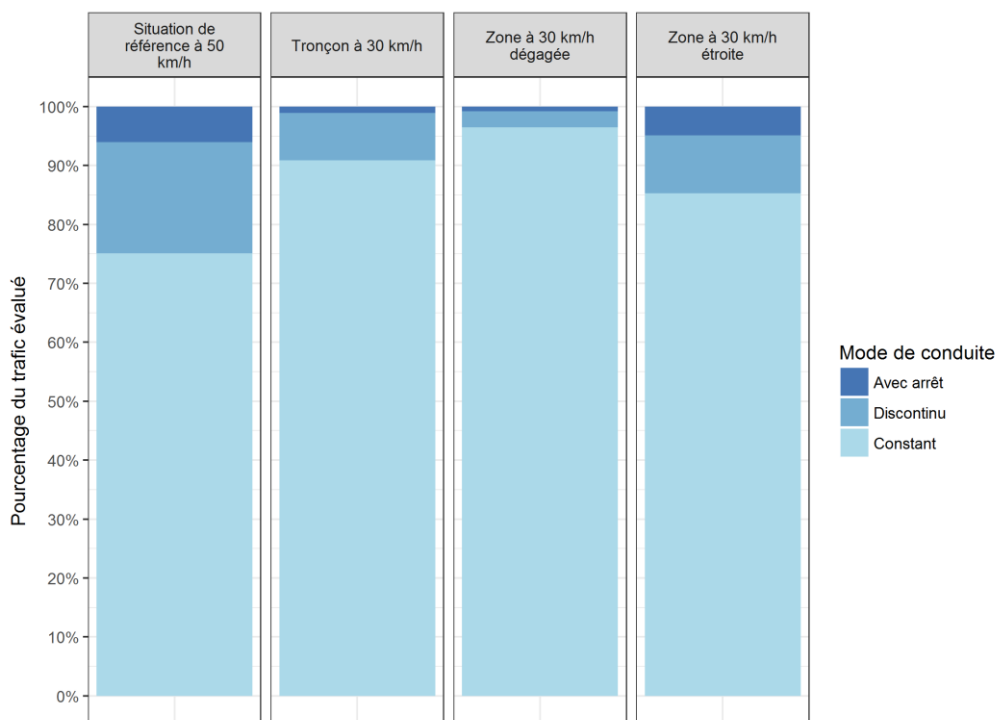
Dans la situation de référence, la vitesse effective est en moyenne nettement inférieure à la vitesse signalisée de 50 km/h ( $v_{Q50}$  : 40 km/h). Pour les trois types de zones examinées et limitées à 30 km/h, on mesure des vitesses nettement inférieures à la situation de référence à 50 km/h. On constate les vitesses les plus basses ( $v_{Q50}$  : 24 km/h) dans la zone à 30 km/h étroite. Sur le tronçon à 30 km/h, les vitesses mesurées sont en moyenne légèrement plus élevées que dans la zone à 30 km/h dégagée ( $v_{Q50}$  : 29 km/h). Mesurée à l'écart interquartile (IQR), la dispersion est relativement semblable pour les trois situations à 30 km/h. Il faut toutefois noter que malgré la vitesse moyenne la plus basse, la dispersion est la plus importante pour la zone à 30 km/h étroite en comparaison avec les autres types de zones. La dispersion est la plus faible pour le tronçon à 30 km/h, bien que la vitesse effective y soit la plus élevée. Pour la situation de référence à 50 km/h, la dispersion des vitesses de conduite est légèrement plus élevée que pour les trois situations examinées à 30 km/h.

**Tableau 14** : Valeurs caractéristiques de la distribution statistique de la vitesse effective pour une conduite constante par type de zone.

Type de zone	Valeur moyenne [km/h]	V <sub>Q50</sub> [km/h]	V <sub>Q85</sub> [km/h]	IQR	N
Situation de référence à 50 km/h	39.7	40	44	8	311
Tronçon à 30 km/h	31.7	32	34	5	334
Zone à 30 km/h dégagée	29.4	29	32	6	747
Zone à 30 km/h étroite	23.6	24	27	7	349

### 3.2.2 Mode de conduite

Le mode de conduite décrit la régularité d'un passage. Alors qu'un mode de conduite constant décrit un comportement de conduite à une vitesse constante, avec un certain rapport de vitesse et des émissions sonores relativement constantes. Le passage en mode de conduite accéléré (avec arrêt ou conduite discontinue) peut engendrer localement des modalités d'émissions de bruit parfois très différentes. On a tenu compte du mode de conduite par des mesurages de passage selon différents scénarios d'accélération et différents régimes de propulsion, qui ont ensuite été catégorisés lors des relevés statistiques concernant le comportement de conduite. La **Figure 16** dresse la liste des résultats des relevés statistiques concernant le mode de conduite en pourcentage du trafic évalué. Les pourcentages sont listés dans le **Tableau 15**.

**Figure 16** : Mode de conduite en pourcentage du trafic évalué.

Dans toutes les situations examinées, les véhicules avec une conduite constante sont nettement majoritaires (de 75 à 97 % du trafic total). Dans la situation de référence avec limitation de vitesse à 50 km/h, la proportion de véhicules en accélération est, avec 25 %, la plus élevée. Dans la situation de la zone à 30 km/h étroite, la proportion d'accélération est plus élevée que dans la zone à 30 km/h dégagée. Dans celle-ci, ainsi que sur le tronçon à 30 km/h, la proportion de véhicules en accélération est, avec 3 %, nettement inférieure à la zone à 30 km/h étroite. Les différences de comportement de conduite peuvent être dues en partie aux mesures de régulation du trafic sur le lieu du

mesurage. Par ailleurs, les emplacements se trouvant à proximité immédiate d'un passage pour piétons ou d'un décrochement vertical ont plus fréquemment provoqué des accélérations que les emplacements de relevés sur tronçon libre. De plus, une meilleure acceptation de la limitation de vitesse par le conducteur lorsque celle-ci est en vigueur depuis longtemps pourrait avoir un effet positif sur le comportement de conduite.

**Tableau 15 : Mode de conduite en pourcentage du trafic évalué par type de zone.**

Type de zone	Mode de conduite	Pourcentage
Situation de référence à 50 km/h	Constant	75.1%
Situation de référence à 50 km/h	Discontinu	18.8%
Situation de référence à 50 km/h	Avec arrêt	6.0%
Tronçon à 30 km/h	Constant	90.9%
Tronçon à 30 km/h	Discontinu	8.0%
Tronçon à 30 km/h	Avec arrêt	1.1%
Zone à 30 km/h dégagée	Constant	96.5%
Zone à 30 km/h dégagée	Discontinu	2.7%
Zone à 30 km/h dégagée	Avec arrêt	0.8%
Zone à 30 km/h étroite	Constant	85.3%
Zone à 30 km/h étroite	Discontinu	9.8%
Zone à 30 km/h étroite	Avec arrêt	4.9%

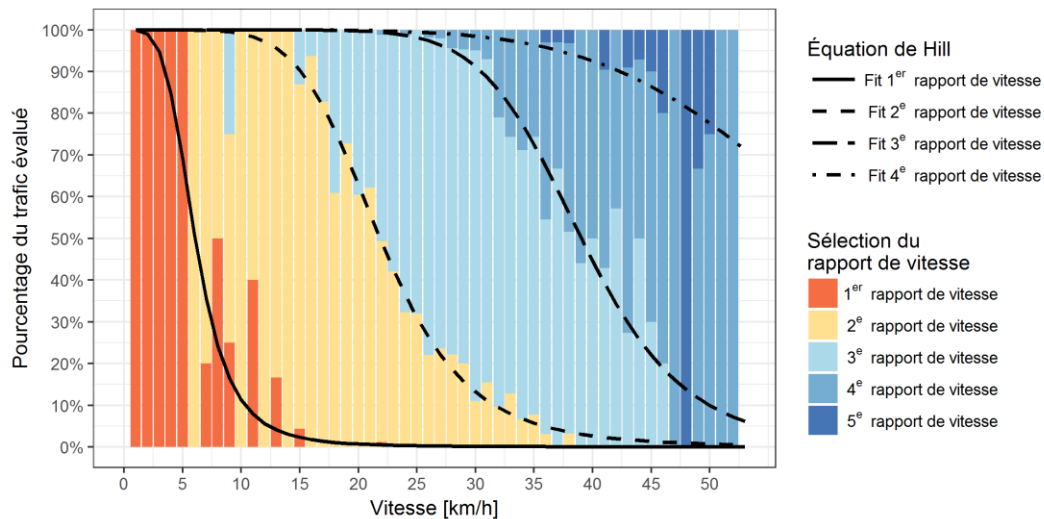
### 3.2.3 Relation vitesse-rapport de vitesse

Comme on le voit à la **Figure 16**, les véhicules circulant à vitesse constante sont nettement majoritaires dans le trafic total (de 75 à 97 % du trafic total). Lorsque le mode de conduite est constant, le bruit de propulsion dépend essentiellement de la vitesse de rotation du moteur. Les données concernant la vitesse et le rapport de vitesse relevées durant l'enquête statistique permettent d'établir une relation entre eux. Partant de cette relation, on peut déterminer, pour chaque vitesse, un pourcentage de véhicules roulant à un certain rapport de vitesse, pourcentage qui est ensuite intégré sous une forme pondérée aux formules sources.

Pour déterminer la relation entre la vitesse et le rapport de vitesse, les distributions de vitesse et rapport de vitesse représentées de manière cumulative à la **Figure 17** ont été ajustées avec l'« équation de Hill ».

$$f_{Gang}(v) = 1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{a_{Gang}}{v}\right)^{b_{Gang}}} \quad \text{Éq. 19.}$$

Où  $v$  désigne la vitesse et  $a_{Gang}$  et  $b_{Gang}$  les paramètres d'estimation de la fonction spécifique aux rapports de vitesse listés au **Tableau 16**.



**Figure 17** : Rapport vitesse-rapport de vitesse (n=1832).

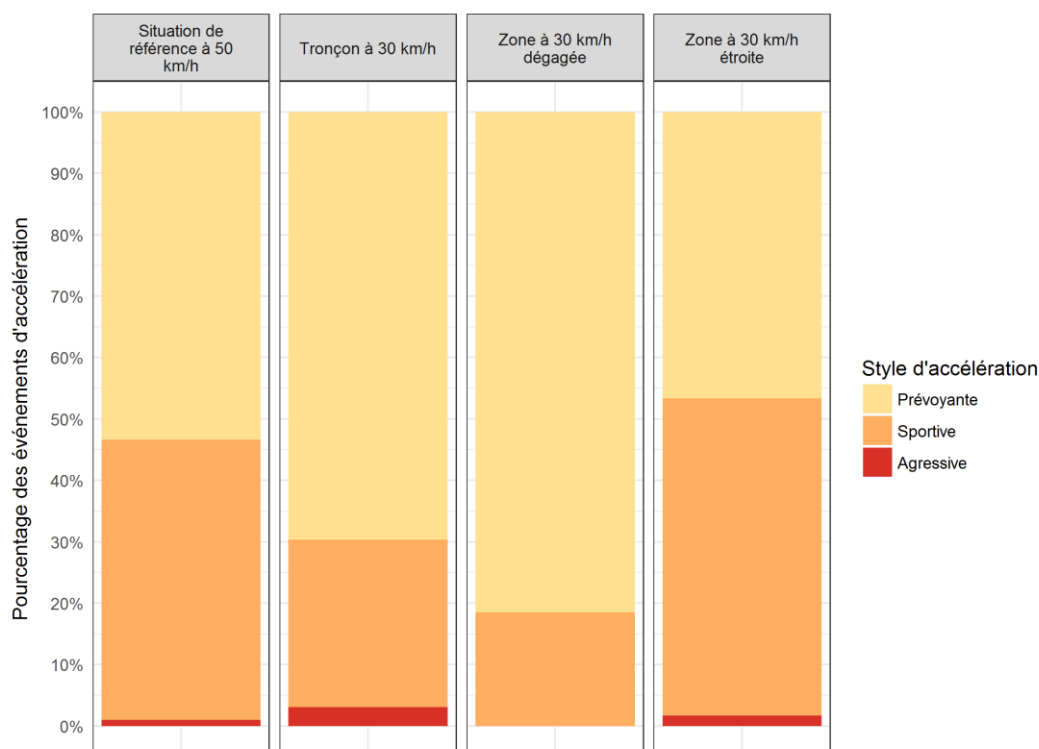
**Tableau 16** : Paramètre d'estimation et erreur type de l'équation de Hill de la relation fonctionnelle vitesse-rapport de vitesse indiquée.

Rapport de vitesse	$a_{Gang} \pm$ Erreur type	$b_{Gang} \pm$ Erreur type
1 <sup>er</sup> rapport de vitesse	6.067 ± 0.34	4.124 ± 0.79
2 <sup>e</sup> rapport de vitesse	21.848 ± 0.23	5.933 ± 0.32
3 <sup>e</sup> rapport de vitesse	39.041 ± 0.36	8.893 ± 0.69
4 <sup>e</sup> rapport de vitesse	62.123 ± 8.57	5.732 ± 2.73

La **Figure 17** et le **Tableau 16** permettent d'estimer, pour une vitesse donnée, quel pourcentage de véhicules roule avec un certain rapport de vitesse. On constate que le 1<sup>er</sup> rapport de vitesse n'est généralement utilisé que pour de très basses vitesses de moins de 15 km/h. Selon la courbe de modèle, dès 6 km/h, la majorité des véhicules passe en 2<sup>e</sup> rapport de vitesse. Ce seuil de vitesse pourrait toutefois être un peu plus élevé dans la réalité ou avec un échantillon plus important à très basse vitesse (voir données de comptage pour 8 et 12 km/h). Dès ~22 km/h, la majorité des véhicules roule en 3<sup>e</sup> rapport de vitesse, et dès ~39 km/h, en 4<sup>e</sup>. Des analyses supplémentaires ont montré que la relation vitesse-rapport de vitesse des véhicules au passage ne présentait pas de spécificités particulières selon les zones. On notera que la présente description de la sélection du rapport de vitesse est une classification acoustique, et que son application à d'autres contextes doit être vérifiée. Les passages effectués avec un moteur partiellement ou complètement découplé (par exemple pour être prêt à freiner) sont généralement assimilés à un faible nombre de tours et attribués au rapport de vitesse élevé correspondant.

### 3.2.4 Style d'accélération

On caractérise le style d'accélération en fonction du comportement concernant le changement de rapport de vitesse et l'utilisation de l'accélérateur durant le processus d'accélération. On distingue les styles anticipateur, sportif et agressif. Durant la campagne de mesurages pour la détermination des formules d'émission concernant les basses vitesses, le style d'accélération a été représenté à l'aide de différents scénarios et catégorisé lors des relevés statistiques sur le comportement de conduite. À la **Figure 18**, les résultats des relevés statistiques concernant le style d'accélération sont décrits sous forme de pourcentages des événements d'accélération. Ces pourcentages sont listés au **Tableau 17**.



**Figure 18 :** Style d'accélération en pourcentage des événements d'accélération.

Une comparaison transversale de toutes les situations examinées montre que la proportion d'événements d'accélération de type sportif ou agressif ayant un impact acoustique est la plus faible dans les zones 30 dégagées (env. 20 %). Dans les zones étroites à 30 km/h, cette proportion est, avec 50 % des événements d'accélération, égale, voire un peu supérieure à celle de la situation de référence avec limitation de vitesse à 50 km/h. On constate que dans l'ensemble, la majorité des véhicules accélère de manière prévoyante. Seuls quelques cas isolés d'accélération agressive ont été répertoriés.

**Tableau 17 :** Style d'accélération en pourcentage des phénomènes d'accélération par type de zone.

Type de zone	Style d'accélération	Pourcentage
Situation de référence à 50 km/h	Agressif	1.0%
Situation de référence à 50 km/h	Sportif	45.6%
Situation de référence à 50 km/h	Prévoyant	53.4%
Tronçon à vitesse limitée à 30 km/h	Agressif	3.0%
Tronçon à vitesse limitée à 30 km/h	Sportif	27.3%
Tronçon à vitesse limitée à 30 km/h	Prévoyant	69.7%
Zone à 30 km/h dégagée	Sportif	18.5%
Zone à 30 km/h dégagée	Prévoyant	81.5%
Zone à 30 km/h étroite	Agressif	1.7%
Zone à 30 km/h étroite	Sportif	51.7%
Zone à 30 km/h étroite	Prévoyant	46.7%

### 3.3 Formules sources

Dans les formules sources, les données issues des relevés statistiques sur le terrain ont été fusionnées avec les formules de calcul d'émission pour le domaine des basses vitesses. Les résultats sont présentés dans la présente section, les effets acoustiques indiqués et leur validation se rapportant toujours au niveau de pression acoustique continu équivalent. Afin de corriger les résultats des formules sources spécifiquement liés aux propriétés acoustiques du revêtement routier de la piste d'essai de Vauffelin, on a converti le bruit de roulement déterminé avec les formules d'émission selon la méthode décrite à la section 2.6.2 pour un revêtement neutre (valeur KB 0 dB dans le modèle d'émission actuel StL86+) correspondant à peu près à un béton enrobé AC 11 plus récent.

#### 3.3.1 Validation grossière des formules sources

Pour valider les formules sources, on a d'abord comparé les mesurages de 18 niveaux de mesure du son de courte durée effectués durant les relevés statistiques sur les comportements de conduite avec les niveaux d'émission pronostiqués. Pour les pronostics, les calculs d'émission prennent en compte les types de revêtement prédominants (voir section 2.6.2), les distributions de la vitesse spécifiques à chaque zone, le relevé statistique du comportement de conduite, le trafic quantifié durant les relevés statistiques et pondéré en fonction de la période du cycle journalier (nuit : 8h, heures creuses : 12h, heures de pointe : 4h) et la proportion de camions. Les distributions de la vitesse spécifiques à chaque type de zone proviennent des résultats des relevés statistiques et sont prises en compte avec la vitesse moyenne mesurée au sommet de la courbe (voir section 3.2.1 répartition de la vitesse). Les modes de conduite et les styles d'accélération spécifiques à chaque type de zone sont également pris en compte selon les résultats des relevés statistiques (voir section 3.2.2 et 3.2.4). Les niveaux acoustiques mesurés sur une courte durée sont réduits à une moyenne pondérée en fonction de la période du cycle journalier (nuit : 8h, heures creuses : 12h, heures de pointe : 4h) afin d'être comparés avec les niveaux pronostiqués. Les résultats de la comparaison entre les niveaux de pression acoustique continus équivalents pronostiqués et mesurés sont rassemblés dans le **Tableau 18**.

**Tableau 18** : Niveau de pression acoustique continu équivalent pronostiqué et mesuré en dB à une distance de 7.5 m depuis le milieu de la chaussée.

Type de zone	Type de revêtement	Véh./h <sup>1</sup>	Vitesse moyenne [km/h]	Proportion de camions [%]	Leq [dB(A)]		
					pronostic <sup>2</sup>	mesurage	Δ
Situation de référence à 50 km/h	SMA 11	625	39.7	2.1	66.2	66.1	0.1
Zone à 30 km/h étroite	AC 8	83	23.6	1.5	53.5	56.6	-3.1
Tronçon à 30 km/h	AC 16	424	31.7	1.2	62.7	61.9	0.8
Zone à 30 km/h dégagée (Bullingerstrasse)	SMA 11	511	29.4	2.3	63.1	63.6	-0.5
Zone à 30 km/h dégagée (Köniz)	ACMR 8 dicht <sup>4</sup>	805	29.4	4.3	65.2	66.7	-1.5

<sup>1</sup> Valeur moyenne pondérée selon l'heure, issue de trois périodes de mesurages (8h nuit, 12h heures creuses, 4h heures de pointe) ou de six périodes de mesurages pour les zones à 30 km/h étroites (2 x nuit, heures creuses et heures de pointe)

<sup>2</sup> Réflexions non prises en compte

<sup>3</sup> Valeur moyenne pondérée selon l'heure, issue de trois périodes de mesurages (8h nuit, 12h heures creuses, 4h heures de pointe) ou de six périodes de mesurages pour les zones à 30 km/h étroites (2 x nuit, heures creuses et heures de pointe)

<sup>4</sup> Revêtement ACMR 8 de la 1<sup>ère</sup> génération, dont les propriétés acoustiques sont semblables à un revêtement SMA 8 (pris en compte dans le modèle).

Dans l'ensemble, les pronostics correspondent bien aux mesurages acoustiques. On constate même de très bonnes concordances pour la situation de référence et la zone à 30 km/h dégagée (Bullingerstrasse), avec des écarts de moins de ±0.5 dB par rapport aux niveaux d'émission mesurés. Les tronçons à 30 km/h présentent un écart légèrement supérieur de 0.8 dB. Dans la zone dégagée à 30 km/h (Köniz), l'écart de -1.5 dB

s'explique en partie par les réflexions survenues à l'emplacement des mesurages. Dans la zone à 30 km/h étroite avec faible trafic, on peut supposer que des bruits parasites et un bruit de fond plus élevé ont influencé les résultats des mesurages acoustiques effectués à l'emplacement le plus silencieux, et donc le plus susceptible d'être affecté par des bruits parasites (par ex. bruit de chantier, bruit aérien, sirènes, etc.).

Limites de la comparaison directe :

- Il faut noter que les mesurages acoustiques de courte durée effectués durant les relevés statistiques n'ont pas pu être surveillés, c'est-à-dire que la présence de bruits parasites n'a pas été contrôlée. Les mesurages ayant été effectués dans un contexte urbain (en ville de Zurich et à Köniz (BE)), les niveaux de mesurage ont tendance à être plus élevés.
- Un point de validation se fonde sur trois niveaux sonores mesurés sur une courte durée relevés durant 30 minutes. Les expériences faites lors de l'exécution des mesures anti-bruit montrent que de légers écarts peuvent survenir pendant les mesurages de courte durée et se refléter sur le niveau mesuré, ceci en relation avec la composition moyenne de la flotte de véhicules locale.
- Les revêtements du même type peuvent présenter des propriétés acoustiques très différentes selon le matériel utilisé, la composition et le mode d'assemblage, ainsi que le stade de vieillissement. Les propriétés spécifiques des revêtements sur les lieux de validation n'ont pas été déterminées par des procédés techniques et ont donc pu être prises en compte que de façon approximative dans les pronostics par le biais des valeurs moyennes des types de revêtement.
- Les mesurages de courte durée ont été partiellement effectués dans des rues bâties des deux côtés (notamment dans la situation de référence, dans la zone à 30 km/h étroite et dans la zone à 30 km/h dégagée de Köniz. Voir aussi les détails des situations à ***l'Annexe II.1***). L'impact des réflexions sur les résultats mesurés n'a pas été déterminé et n'est pas pris en compte dans la modélisation. Dans ces situations, le modèle a donc tendance à sous-estimer le niveau de bruit.

### 3.3.2 Comparaison avec le modèle d'émissions suisse StL86+ à une vitesse de 50 km/h

Le modèle d'émission StL86+ est très couramment utilisé en Suisse pour calculer les émissions à des vitesses avoisinant les 50 km/h. Comme les formules sources élaborées dans cette étude doivent servir à compléter les formules d'émission pour les basses vitesses, on procède ci-après à une comparaison entre les deux modèles à une vitesse de 50 km/h. Cette comparaison se fonde sur les valeurs d'émission modélisées pour la situation de référence avec limitation de vitesse à 50 km/h à partir des formules sources, et sur le modèle d'émission suisse StL86+. Pour les deux modèles, le niveau de pression acoustique continu équivalent a été calculé pour un véhicule, avec une proportion de 6 % de camions et un revêtement acoustiquement neutre, à une distance de 1 m de la source (voir **Tableau 19**). Les trois zones à vitesse limitée à 30 km/h des formules sources n'ont pas été utilisées pour la comparaison en raison des différences dans les modes de conduite et les distributions de la vitesse.

**Tableau 19** : Comparaison entre les niveaux de pression acoustique continus équivalents pronostiqués avec les formules sources et avec le modèle d'émission suisse StL86+.

Modèle d'émission (avec paramètres)	Leq [dB(A)]
StL86+ (v = 50 km/h ; proportion de N1 = 0.94 ; proportion de N2 = 0.06 ; revêtement acoustiquement neutre)	48.6
Formules sources (Distributions statistiques du comportement de conduite à partir de « situation de référence à 50 km/h » ; distribution de la vitesse « situation de référence à 50 km/h » $v_{Q50} = 50$ km/h ; proportion de VT = 0.94 ; proportion de camions = 0.06 ; revêtement acoustiquement neutre)	48.3

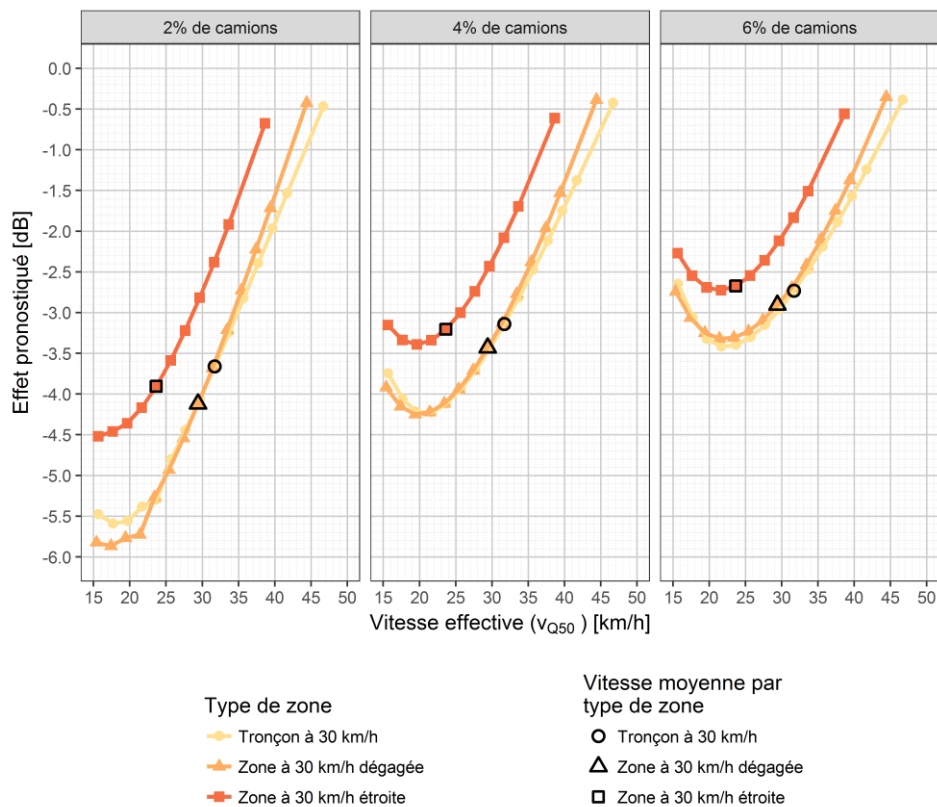


La comparaison révèle une très bonne concordance entre le modèle d'émission StL86+ et les formules sources pour un revêtement acoustiquement neutre à 50 km/h avec une proportion de N2 de 6 %.

Dans cette comparaison, il faut tenir compte du fait que, comme le montrent des expériences faites lors de mesurages de passage, le modèle d'émission StL86+ contient une erreur systématique pour les catégories de véhicules considérées séparément à 50 km/h (tendance à sous-estimer les émissions des voitures de tourisme et à surestimer les émissions des camions). Les comparaisons entre les mesurages acoustiques et les calculs par modèles pour un trafic mixte lors de projets d'assainissement ont cependant montré, dans la plupart des cas, une bonne concordance pour le modèle StL86+ pour des vitesses situées aux alentours de 50 km/h.

### 3.3.3 Influence des vitesses

L'impact acoustique d'une réduction de la vitesse peut être différent en fonction de la vitesse de circulation effective dans la situation cible. La **Figure 19** précise cette situation pour les trois types de zones à vitesse limitée à 30 km/h en comparant l'effet pronostiqué avec une situation où  $v_{Q50} = 50$  km/h, comprenant une proportion de camions de 2, 4 ou 6 % et un revêtement neutre (valeur KB 0 dB, correspondant à peu près à un revêtement AC 11 plus récent).



**Figure 19 :** Impact acoustique pronostiqué de la réduction de la vitesse sur le niveau de pression acoustique continu équivalent en dB, en partant d'une situation initiale avec  $v_{Q50}=50$  km/h tributaire de la vitesse de conduite effective moyenne ( $v_{Q50}$ ), avec 2, 4 et 6 % de camions et un revêtement acoustiquement neutre. La vitesse effective (axe x) se rapporte au sommet de la distribution de la vitesse en fonction de la zone pour les trois situations où la vitesse est limitée à 30 km/h. L'impact acoustique pronostiqué est indiqué en partant de la distribution de la vitesse dans la situation initiale à  $v_{Q50}=50$  km/h. L'impact acoustique pour la vitesse moyenne en fonction du type de zone est marqué avec un cadre noir. L'impact acoustique a été calculé à partir des vitesses moyennes selon les types de zones pour des intervalles de 2 km/h (symbole) et déduit par interpolation linéaire entre les valeurs calculées.

L'impact acoustique évolue de façon analogue pour les trois situations. L'augmentation de la vitesse effective entraîne une diminution de l'impact acoustique pronostiqué en réduisant la vitesse. En fonction du type de zone, l'impact acoustique pronostiqué présente une zone où il atteint son maximum (entre 20 et 25 km/h). Un aspect essentiel de ce phénomène pourrait être qu'en-dessous de ces vitesses, la conduite s'effectue statistiquement davantage à un faible rapport de vitesse, c'est-à-dire avec un nombre de tours élevé (cf. **Figure 13**). De plus, à de très basses vitesses, le passage du véhicule dure plus longtemps, d'où une plus grande quantité d'énergie parvenant au récepteur.

À une vitesse moyenne ( $v_{Q50}$ ) de 30 km/h, les tronçons à 30 km/h et les zones à 30 km/h dégagées présentent l'impact acoustique le plus notable en comparaison transversale avec la situation initiale avec vitesse limitée à 50 km/h, avec un potentiel de réduction du bruit de -4.1 dB (proportion de camions de 2 %), de -3.4 dB (proportion de camions de 4%) et -2.9 dB (proportion de camions de 6%). Pour les zones à 30 km/h étroites, il faut s'attendre pour la même vitesse à des effets moindres d'environ 1 à 1.5 dB en raison du comportement de conduite. Si l'on considère la vitesse de conduite moyenne effective spécifique à la zone, on peut prévoir les effets suivants (voir **Tableau 20**) :

**Tableau 20** : Impact pronostiqué de la réduction de vitesse sur le niveau de pression acoustique continu équivalent en dB, en partant d'une situation initiale où  $v_{Q50}=50$  km/h tributaire de la vitesse effective moyenne ( $v_{Q50}$ ) pour une proportion de 2, 4 et 6 % de camions sur un revêtement acoustiquement neutre.

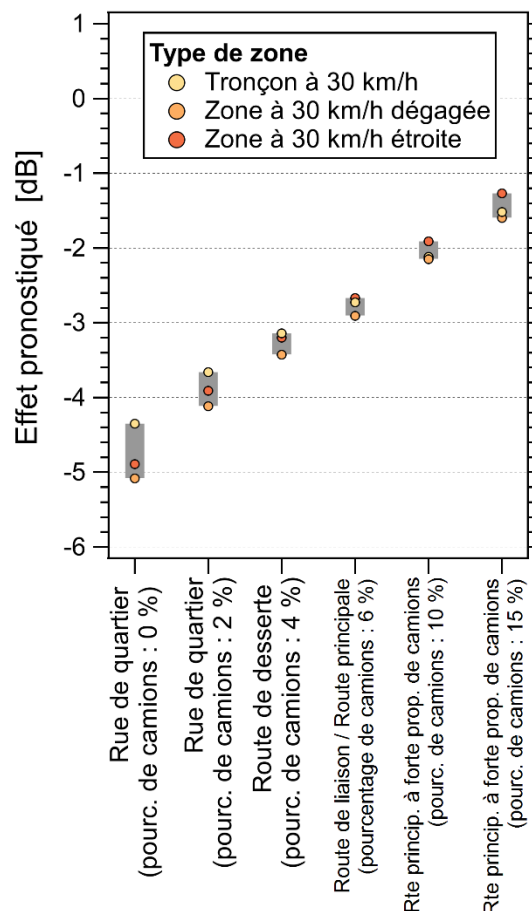
Type de zone	Impact pronostiqué [dB]								
	2%			4%			6%		
Proportion de camions	2%	4%	6%	2%	4%	6%	2%	4%	6%
	Avec vitesse moyenne selon le type de zone			Avec vitesse moyenne selon le type de zone + 6 km/h			Effet maximal		
Tronçon à 30 km/h	-3.7	-3.1	-2.7	-2.4	-2.1	-1.9	-5.6	-4.2	-3.4
Zone à 30 km/h dégagée	-4.1	-3.4	-2.9	-2.7	-2.4	-2.1	-5.9	-4.3	-3.3
Zone à 30 km/h étroite	-3.9	-3.2	-2.7	-2.8	-2.4	-2.1	-4.5	-3.4	-2.7

Les valeurs relevées indiquées dans le **Tableau 20** concordent avec les relevés de l'impact acoustique maximum de la limitation de vitesse à 30 km/h effectués jusqu'ici [8], [9].

Remarque : les valeurs indiquées au paragraphe précédent se rapportent à une proportion spécifique de camions sur un revêtement routier acoustiquement neutre (par ex. revêtement AC 11 plus récent). Avec une autre proportion de camions, l'influence de la vitesse effective peut être sensiblement différente.

### 3.3.4 Influence de la proportion de camions

Dans le cadre du présent projet de recherche, les émissions des camions concernant les basses vitesses n'ont pas été examinées de manière spécifique, et n'ont été prises en compte dans les formules sources que sur la base du modèle européen d'émission CNOSSOS (pour une explication détaillée, voir **chapitre 2**). Les valeurs présentées dans ce paragraphe peuvent donc contenir des incertitudes. Comme on ne dispose pas d'une formule d'émission séparée pour d'autres véhicules bruyants (catégorie N2 selon l'Ordonnance sur la protection contre le bruit) tels que tracteurs, motos, etc., il est recommandé d'imputer les véhicules présentant une signature sonore particulièrement bruyante à la catégorie des camions. Le graphique de la **Figure 20** montre l'impact acoustique potentiel de quatre types de routes caractéristiques avec une proportion de camions typique de 0 à 15 % et un revêtement acoustiquement neutre.



**Figure 20** : Pronostics de l'impact sur le niveau de pression acoustique continu équivalent en dB pour différents types de routes et une proportion de camions de 0 à 15 % en partant d'une situation initiale où  $v_{Q50}=50$  km/h avec un revêtement acoustiquement neutre. L'impact pronostiqué se rapporte à la vitesse moyenne pour chaque type de zone avec limitation de vitesse à 30 km/h.

Comme le montre la **Figure 20**, l'impact acoustique des réductions de vitesse peut être très différent selon le type de route et la proportion de camions. L'impact acoustique d'une réduction de vitesse diminue constamment avec l'augmentation de la proportion des camions. Dans une rue de quartier avec une proportion de camions de 2 %, l'impact prévisible va de -4.1 à -3.7 dB en fonction du type de zone. Sur les routes principales, avec une forte proportion de camions de l'ordre de 10 à 15 %, l'impact prévisible d'une limitation de vitesse à 30 km/h n'est plus que de -2.2 à -1.3 dB. À partir d'une proportion de camions de 20 %, les réductions de vitesse n'ont pratiquement plus d'impact acoustique (effet <1 dB).

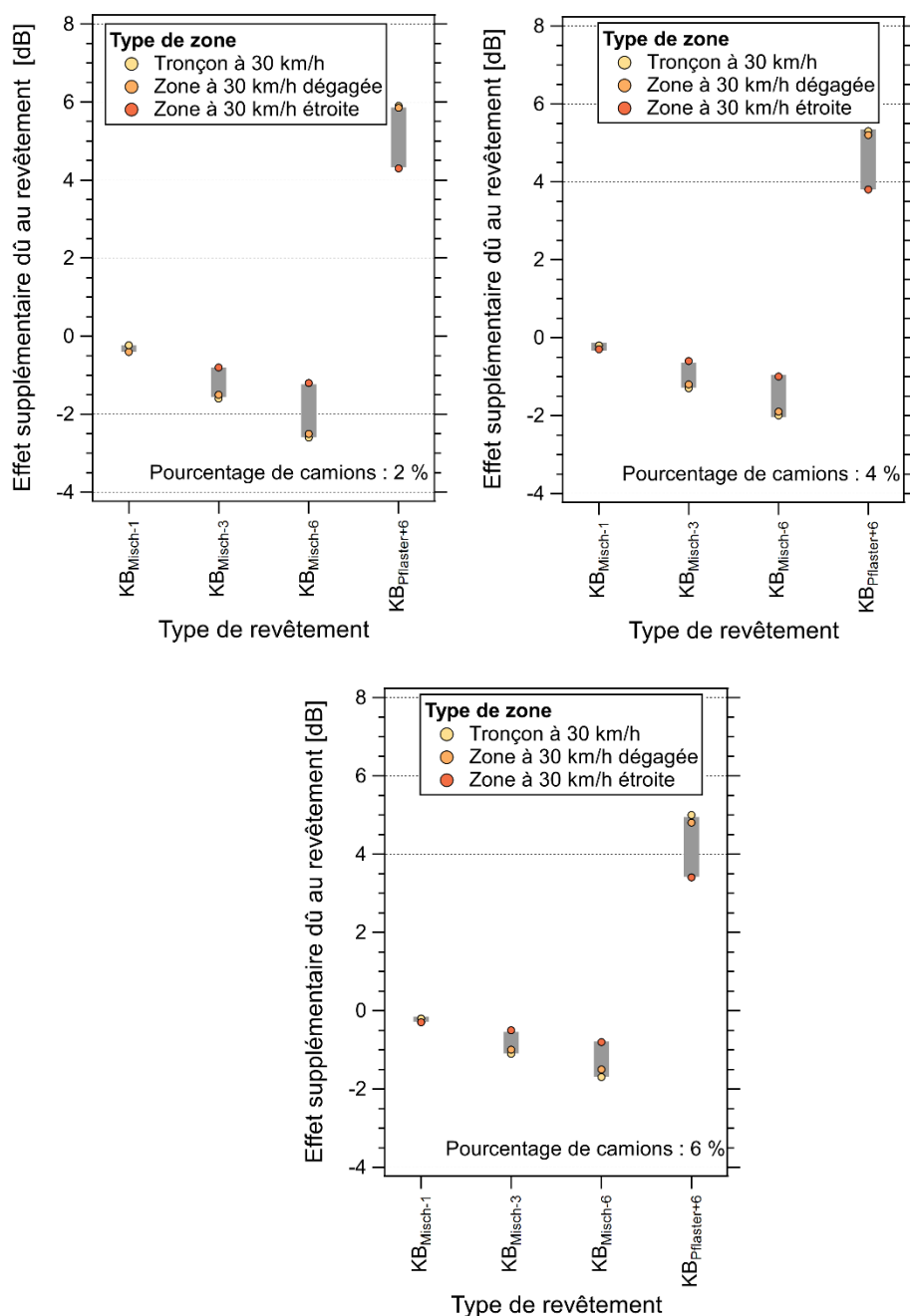
**Tableau 21** : Pronostics de l'impact sur le niveau de pression acoustique continu équivalent en dB pour différents types de routes et des proportions de camions de 0 à 15 %, en partant d'une situation initiale où  $v_{Q50}=50$  km/h avec un revêtement acoustiquement neutre. L'impact pronostiqué se rapporte à la vitesse moyenne pour chaque type de zone avec limitation de vitesse à 30 km/h.

Type de zone	Effet pronostiqué [dB]					
	0 %	2 %	4 %	6 %	10 %	15 %
Tronçon à 30 km/h	-4.4	-3.7	-3.1	-2.7	-2.1	-1.6
Zone à 30 km/h dégagée	-5.1	-4.1	-3.4	-2.9	-2.2	-1.5
Zone à 30 km/h étroite	-4.9	-3.9	-3.2	-2.7	-1.9	-1.3

Remarque : Les valeurs présentées dans ce paragraphe sont valables pour la vitesse moyenne spécifique au type de zone et un revêtement acoustique neutre (par exemple un revêtement AC 11 récent). Des différences dans la vitesse effective et la proportion de camions peuvent sensiblement modifier l'influence du revêtement.

### 3.3.5 Influence du revêtement routier

La pose d'un nouveau revêtement permet d'accroître l'impact acoustique de la réduction de vitesse. Afin de pouvoir estimer l'efficacité des revêtements peu bruyants pour les basses vitesses, la **Figure 21** montre l'impact supplémentaire obtenu grâce à un tel revêtement en comparaison avec un revêtement acoustiquement neutre, ceci pour un trafic comprenant une part de 2, 4 et 6 % de camions et pour quatre classes de revêtements sélectionnées. Les classes de revêtement sont indiquées par des valeurs caractéristiques s'écartant du modèle d'émission StL86+ et elles se rapportent à chaque fois à la valeur du trafic mixte avec une proportion de 8 % de véhicules lourds (N2).



**Figure 21 :** Impact acoustique supplémentaire prévisible pour plusieurs revêtements cibles possédant différentes valeurs caractéristiques ( $kb$ ), avec une proportion de camions de 2, 4 et 6 %. La situation initiale est celle d'une limitation de vitesse à 30 km/h avec vitesse moyenne selon le type de zone et un revêtement acoustiquement neutre.

La **Figure 21** montre que la mise en place de revêtements peu bruyants dans une situation avec limitation de vitesse à 30 km/h permet d'augmenter l'impact acoustique de la réduction de vitesse. L'impact acoustique d'un tel revêtement est toutefois nettement plus faible qu'à 50 km/h (où l'impact prévisible correspond à la valeur caractéristique du revêtement). Avec une proportion de 2 % de camions, on obtient un impact supplémentaire de -0.3 dB pour un revêtement doté d'une valeur caractéristique de -1, de -0.8 à -1.6 dB pour un revêtement doté d'une valeur caractéristique de -3 et de -1.2 à -2.6 dB pour un revêtement doté d'une valeur caractéristique de -6. Par ailleurs, lorsque la vitesse est limitée à 30 km/h, l'impact d'une surface routière bruyante est également moindre. Pour un pavage dont l'effet est normalement de + 6 dB, l'augmentation maximale du volume sonore sera de 4.3 à 5.9 dB à 30 km/h avec une proportion de camions de 2 %.

Au **Tableau 22** et **Tableau 24**, l'impact acoustique du revêtement avec une limitation de vitesse à 30 km/h est représenté en pourcentage de l'effet obtenu à 50 km/h. Les valeurs se rapportent à une proportion de 2, 4 et 6 % de camions.

**Tableau 22** : Pourcentage d'impact supplémentaire obtenu grâce au revêtement avec une vitesse signalée de 30 km/h par rapport à l'effet de ce même revêtement à 50 km/h, avec une proportion de 2 % de camions.

Type de zone	KB <sub>misch-1</sub>	KB <sub>misch-3</sub>	KB <sub>misch-6</sub>	Pflaster <sub>Misch+6</sub>
Tronçon à 30 km/h	41%	52%	43%	98%
Zone à 30 km/h dégagée	40%	51%	42%	98%
Zone à 30 km/h étroite	23%	27%	21%	72%

**Tableau 23** : Pourcentage d'effet supplémentaire obtenu grâce au revêtement avec une vitesse signalée de 30 km/h par rapport à l'effet de ce même revêtement à 50 %, avec une proportion de 4 % de camions.

Type de zone	KB <sub>misch-1</sub>	KB <sub>misch-3</sub>	KB <sub>misch-6</sub>	Pflaster <sub>Misch+6</sub>
Tronçon à 30 km/h	34%	43%	34%	89%
Zone à 30 km/h dégagée	32%	40%	32%	87%
Zone à 30 km/h étroite	18%	21%	16%	63%

**Tableau 24** : Pourcentage d'effet supplémentaire obtenu grâce au revêtement avec une vitesse signalée de 30 km/h par rapport à l'effet de ce même revêtement à 50 km/h, avec une proportion de 6 % de camions.

Type de zone	KB <sub>misch-1</sub>	KB <sub>misch-3</sub>	KB <sub>misch-6</sub>	Pflaster <sub>Misch+6</sub>
Tronçon à 30 km/h	29%	37%	28%	83%
Zone à 30 km/h dégagée	27%	33%	25%	79%
Zone à 30 km/h étroite	15%	18%	13%	57%

Le **Tableau 25** indique le même impact en pourcentage lorsque la proportion de camions est de 0%, ce qui correspond à l'effet maximal des revêtements peu bruyants lorsque la vitesse est limitée à 30 km/h. Lorsque la proportion de camions est faible, on peut s'attendre à une efficacité nettement plus forte du revêtement.

**Tableau 25** : Pourcentage de l'impact acoustique obtenu grâce au revêtement avec une vitesse signalée de 30 km/h par rapport à l'effet de ce même revêtement à une vitesse signalée de 50 km/h, avec une proportion de 0 % de camions.

Type de zone	KB <sub>misch-1</sub>	KB <sub>misch-3</sub>	KB <sub>misch-6</sub>	Pflaster <sub>Misch+6</sub>
Tronçon à 30 km/h	52%	68%	60%	109%*
Zone à 30 km/h dégagée	55%	72%	65%	112%*
Zone à 30 km/h étroite	30%	36%	29%	85%

\* Des valeurs supérieures à 100 % sont possibles car la valeur caractéristique du revêtement pour le trafic mixte additionne les émissions de bruit de roulement des voitures de tourisme et des camions. Le pavage a un effet acoustique plus important sur le bruit de roulement des voitures de tourisme que sur celui des camions.

Remarque : Les valeurs présentées dans ce paragraphe sont valables pour la vitesse moyenne spécifique au type de zone et la proportion de camions indiquée. Des différences dans la vitesse effective et la proportion de camions peuvent sensiblement modifier l'influence du revêtement.

### 3.4 Points limitants

Dans le cadre du présent projet de recherche, on a pu récolter un ensemble de données actualisées sur le bruit de roulement et le bruit de propulsion des voitures de tourisme dans le domaine des basses vitesses. La validation approximative indique qu'à partir d'un échantillon comprenant 21 voitures de tourisme représentatives et une voiture de livraison (<3.5t), il est possible de représenter de manière fiable les émissions de bruit de la flotte de véhicules de cette catégorie dans toute la Suisse. Des données permettant de tenir compte de l'impact acoustique du comportement de conduite pour de basses vitesses ont également été récoltées. L'utilisation de l'hypothèse source est néanmoins soumise aux limitations suivantes :

- **Incertitudes lorsque la proportion de camions est élevée.** Dans le cadre de ce projet, il n'a pas été possible de recueillir des données concernant la catégorie des camions. On s'est donc référé à la formule d'émission des camions du modèle européen d'émission de bruit routier CNOSSOS, basée sur des données récoltées dans les années 2000. Les analyses montrent que le bruit global produit par la flotte suisse de véhicules lourds circulant à 50 km/h à l'intérieur des localités est supérieur d'env. 0.6 dB aux valeurs enregistrées dans l'Union européenne. Cette différence est essentiellement due à une distribution statistique différente des camions circulant à l'intérieur des localités par rapport à la catégorie *heavy vehicles* de CNOSSOS. La formule d'émission de CNOSSOS a été calibrée en conséquence. Une telle vérification n'étant pas possible pour des vitesses inférieures en raison du manque de données, l'adaptation n'a pas pu être effectuée de manière spécifique concernant les basses vitesses. La prudence est donc de mise lors de l'estimation de l'impact acoustique des réductions de vitesse sur des routes comportant une forte proportion de camions (par ex. routes principales). Ceci notamment parce que cet impact n'a pas pu être validé séparément pour la catégorie des camions.
- **Incertitudes concernant la modélisation des véhicules bruyants (N2).** Comme on ne dispose pas d'une formule d'émission distincte pour les véhicules bruyants de la catégorie N2 de l'Ordonnance sur la protection contre le bruit (par ex. tracteurs, motocycles, etc.), il est conseillé d'imputer les véhicules présentant une signature sonore particulièrement bruyante à la catégorie des camions. Bien qu'on puisse supposer que la pondération des principales sources de bruit (respectivement du bruit de propulsion et de roulement), s'opère de la même façon que pour la catégorie des camions, l'estimation de l'impact acoustique peut comporter des incertitudes lorsque la proportion de ces véhicules est élevée.
- **Incertitudes concernant la relation mesures-impact acoustique.** Les formules sources pour le domaine des basses vitesses présentées dans ce rapport se fondent sur des relevés statistiques du comportement de conduite dans cinq situations avec vitesse limitée à 30 km/h et sur un tronçon de référence avec vitesse signalisée à 50 km/h à l'intérieur d'une localité. Il est possible qu'en raison de mesures de construction et d'aménagement spécifiques, le comportement de conduite rencontré dans certaines situations d'évaluation diffère de celui qui a été décrit ici pour les types de zones examinés. Bien que ces écarts puissent être pris en considération dans les formules sources par une adaptation de la vitesse moyenne (ou par un décalage correspondant de la distribution de la vitesse), il faut s'attendre, dans de telles situations, à ce que le comportement de conduite spécifique, et donc l'impact acoustique, s'écartent des valeurs présentées ici, en particulier à proximité des mesures de construction ou d'aménagement. Lorsque ces mesures diffèrent fortement de celles qui sont décrites dans le présent rapport, il convient de vérifier au préalable leur impact sur le comportement de conduite, et, le cas échéant, de les prendre en considération dans l'estimation.
- **Incertitudes concernant l'impact acoustique sur une route en pente.** Les effets acoustiques indiqués dans ce rapport se rapportent à des tronçons plats et à des routes dont le tracé est horizontal. On peut supposer que les constats sont également valables

pour les pentes jusqu'à 6 % lorsque la proportion de camions est faible. En raison de moteurs toujours plus puissants et de la tendance à des véhicules plus fortement motorisés, ce n'est qu'à partir d'une pente de 6 % qu'il faut compter avec une adaptation progressive du mode de conduite et du rapport de vitesse sélectionné. En cas de doute, il faut vérifier sur le terrain l'éventualité d'une différence de mode de conduite due à la pente.

- **Incertitudes concernant les différents revêtements routiers.** Les effets acoustiques indiqués pour la limitation de vitesse à 30 km/h aux paragraphes **3.3.3** et **3.3.4** s'appliquent à un revêtement acoustiquement neutre (par ex. revêtement AC 11 plus récent). Les revêtements dotés d'autres propriétés acoustiques peuvent engendrer un effet acoustique sensiblement différent.
- **Procédure de validation incomplète.** Une validation complète des formules sources n'a pas été possible dans le cadre de ce projet de recherche. La validation grossière montre cependant qu'en dépit des limitations mentionnées, les nouvelles formules sources concernant les basses vitesses permettent une estimation de l'impact acoustique plus fiable que les formules d'émission disponibles jusqu'ici. Il est souhaitable de poursuivre la validation des formules sources avec de nouvelles données de mesurage et des relevés simultanés du comportement de conduite dans différentes situations avec vitesse limitée à 30 km/h, et avec différentes mesures.



## 4 Conclusions

Dans la présente recherche, on a déterminé l'impact acoustique de la limitation de vitesse à 30 km/h en redéfinissant les formules d'émission pour la flotte de véhicules moderne et en prenant en compte les comportements de conduite spécifiques. Les principaux résultats sont les suivants :

- **La limitation de la vitesse à 30 km/h permet une réduction substantielle du bruit.** La recherche montre qu'une réduction de vitesse est dans de nombreux cas une mesure efficace pour réduire les émissions de bruit à la source. En diminuant la vitesse de 50 à 30 km/h, on obtient des réductions du niveau sonore d'env. 2 à 4.5 dB selon la vitesse de conduite effective, la proportion de camions et le revêtement routier. En particulier lorsque le problème du bruit se pose la nuit, période durant laquelle la proportion de camions est généralement faible, la limitation de vitesse à 30 km/h peut conduire à des réductions substantielles du niveau sonore. Des réductions perceptibles du bruit sont également prévisibles en journée dans la grande majorité des situations.
- **L'estimation de l'impact acoustique est plus fiable.** En prenant en compte la flotte de véhicules actuelle, le comportement de conduite et le type de zone, les formules sources développées concernant les basses vitesses dans le cadre de ce projet permettent une estimation plus fiable de l'impact acoustique de la limitation de la vitesse à 30 km/h par rapport aux modèles disponibles jusqu'ici.
- **Il est très important de prendre en compte la flotte de véhicules actuelle.** Les récentes évolutions de l'industrie automobile vers des moteurs moins bruyants et des véhicules plus lourds entraînent un net déplacement des principales sources de bruit, avec une diminution du bruit de propulsion et une augmentation du bruit de roulement. Les résultats de la présente recherche montrent que les conséquences de ce phénomène sont particulièrement marquées dans le domaine des basses vitesses. La zone de transition où le bruit de roulement devient dominant par rapport au bruit de propulsion s'est déplacée vers des vitesses plus basses. Cela signifie que l'impact d'une diminution du bruit de propulsion sur le bruit global est surtout sensible aux basses vitesses. Il est donc très important de prendre en compte la flotte de véhicules actuelle pour déterminer de manière fiable l'impact acoustique de la limitation de vitesse à 30 km/h.
- **Il est essentiel de prendre en compte le comportement de conduite.** Le comportement de conduite peut être nettement différent à 30 km/h et à 50 km/h, ce qui a des effets déterminants sur les émissions de bruit.
- **La nature des mesures et le type de zone sont déterminants.** L'impact acoustique de la limitation de vitesse à 30 km/h est aussi influencé par les mesures mises en œuvre. Il diffère ainsi selon le type de zone (zone étroite comprenant de nombreuses mesures, zone dégagée avec peu de mesures et tronçons sans mesures d'accompagnement). L'étude montre que pour un flux de véhicules continu, il est possible d'obtenir des réductions de vitesse significatives et donc une nette diminution du bruit même sans mettre en place d'importantes mesures de construction. Dans le cas des zones à 30 km/h étroites, qui se rencontrent souvent dans les petites rues de quartier, c'est en diminuant encore la vitesse qu'on obtient un effet sur le bruit, celui-ci étant partiellement amoindri par le mode de conduite discontinu. Des zones à vitesse limitée à 30 km/h continuent à être instaurées surtout pour des raisons de sécurité du trafic et de gain de qualité de vie pour la population résidente, et la protection contre le bruit est désormais un atout supplémentaire.

**Identifier et quantifier les causes d'une forte dispersion de l'effet sur le bruit.** En se basant sur l'impact acoustique pronostiqué pour différentes situations avec vitesse limitée à 30 km/h, ce travail de recherche a permis d'identifier et de quantifier les causes de la forte dispersion de cet impact observée dans des études de cas. Les principaux facteurs d'influence sont décrits ci-dessous et détaillés en fonction de leur importance pour la pratique :

### Vitesse effective

- **La réduction effective de la vitesse est déterminante.** Une des principales grandeurs d'influence de l'impact acoustique est la réduction de la vitesse effectivement atteinte au moyen de la limitation à 30 km/h (la différence entre les vitesses de conduite effectives dans la situation initiale et dans la situation cible).
- **Réduire la vitesse de 10 km/h seulement a déjà un effet sur le bruit.** Dans la plupart des situations, il suffit de réduire la vitesse effective de 10 km/h pour diminuer sensiblement le bruit.
- **Conduire plus lentement ne veut pas toujours dire produire moins de bruit.** Les vitesses inférieures à env. 25 km/h n'entraînent pas toujours des réductions plus conséquentes du bruit, en particulier lorsque les mesures prises conduisent à un mode de conduite discontinu et à de plus faibles rapports de vitesse.

### Proportion de camions

- **La proportion de camions contribue beaucoup à la dispersion de l'effet sur le bruit.** La présente recherche montre que la proportion de camions sur une route est une grandeur d'influence importante. L'impact acoustique de la limitation de vitesse à 30 km/h diminue nettement lorsque la proportion de camions augmente. Ce phénomène est dû au bruit de propulsion des camions, plus dominant et moins dépendant de la vitesse que celui des voitures de tourisme.
- **Lorsque la proportion de camions est supérieure à 15 %, l'impact acoustique est faible.** Avec une proportion de camions supérieure à 15 %, la limitation de vitesse à 30 km/h n'a plus qu'une faible efficacité acoustique.
- **Incertitudes en cas de proportions plus élevées de camions et de véhicules bruyants (N2).** Dans le présent projet, les émissions des camions et des véhicules bruyants dans le domaine des basses vitesses n'ont pas été examinées de manière spécifique ; elles ont été prises en compte uniquement par le biais d'un modèle existant qui a été adapté. Cette lacune doit inciter à la prudence lors de l'estimation de l'impact acoustique de la limitation de vitesse à 30 km/h sur les routes comprenant une proportion élevée de camions et de véhicules bruyants.

### Propriétés acoustiques des revêtements routiers

- **Les revêtements peu bruyants augmentent l'efficacité des limitations de vitesse à 30 km/h.** Les propriétés acoustiques du revêtement ont une influence déterminante sur l'impact acoustique des limitations de vitesse à 30 km/h. Le principe qui s'applique est que plus le revêtement routier est bruyant et il contribue à la production du bruit de roulement, plus le potentiel de réduction du bruit par une limitation à 30 km/h est élevé.
- **Les revêtements routiers peu bruyants peuvent être combinés à des limitations de vitesse à 30 km/h comme mesures anti-bruit.** De manière prévisible, l'impact des revêtements peu bruyants est plus faible à 30 km/h qu'à 50 km/h. Dans de nombreux cas, l'impact supplémentaire obtenu avec un tel revêtement à 30 km/h est inférieur d'environ 50 % à son impact à 50 km/h, mais il peut varier de 20 à 70 % selon les situations. En fonction de la valeur caractéristique du revêtement peu bruyant, l'impact supplémentaire pour une vitesse de 30 km/h ira jusqu'à -2 dB. Dans certaines situations, la combinaison d'une mesure de limitation de vitesse à 30 km/h et d'un revêtement peu bruyant est donc envisageable pour atteindre le but visé. Son efficacité augmente lorsque la proportion de camions est faible.

### Besoins supplémentaires en matière de recherche :

- **Étudier les émissions de bruit des camions dans le domaine des basses vitesses.** Cette étude s'est focalisée sur les émissions de bruit des voitures de tourisme pour des basses vitesses. Les émissions des camions n'ont pas fait l'objet d'une étude spécifique. La proportion de camions représentant une grandeur d'influence décisive, les futures recherches devront se pencher sur les émissions des camions dans le domaine des basses vitesses afin de les déterminer plus précisément.
- **Étudier la relation entre les mesures et l'impact acoustique.** Les recherches effectuées jusqu'ici montrent que les vitesses de conduite effectives et les comportements de conduite sont influencés par les mesures de construction et d'aménagement qui accompagnent les limitations de vitesse à 30 km/h. La différenciation de 3 types de zones (tronçon à 30 km/h, zone à 30 km/h dégagée, zone à 30 km/h étroite) permet de prendre en compte cette influence de manière indirecte. Dans le cadre de futurs projets de recherche, il est recommandé d'examiner plus en détail la relation directe entre les mesures et l'impact acoustique.
- **Étudier l'effet combiné des limitations de vitesse à 30 km/h et des revêtements peu bruyants.** La présente étude a modélisé l'effet combiné des revêtements peu bruyants et des limitations de vitesse à 30 km/h. Il s'agit maintenant de vérifier cet effet par des mesurages.
- **Étudier la pente.** Les impacts acoustiques indiqués dans ce rapport concernent les routes présentant un tracé horizontal. Dans le cadre de futurs projets de recherche, il est recommandé d'examiner plus en détail l'effet de la limitation de vitesse à 30 km/h pour des pentes plus importantes (plus de 6 %).



## 5 Exemple d'estimation d'effet acoustique dans la pratique

Une brève marche à suivre est proposée ci-dessous pour estimer l'effet des réductions de vitesse dans la pratique. Le principe qui s'applique est le suivant : plus on dispose de données de base détaillées sur la situation initiale et sur la situation cible, plus l'estimation de l'impact acoustique sera précise. Les auteurs recommandent d'utiliser les paramètres répertoriés dans le **Tableau 26** issus des mesurages les plus récents possibles.

**Tableau 26 : Données de base recommandées pour l'estimation de l'impact acoustique d'une réduction de vitesse.**

Situation	Paramètre	Description
Situation initiale	Nt	Trafic routier motorisé horaire moyen en journée
	Nt2	Part trafic lourd en journée
	Nn	Trafic routier motorisé horaire moyen de nuit
	Nn2	Part trafic lourd de nuit
	v-sig	Vitesse signalée
	v-eff	Vitesse de conduite effective moyenne
	Revêtement routier	Optimum : signature acoustique ou valeur acoustique caractéristique du revêtement routier Minimum : type de revêtement, année de mise en place, teneur en vide sur échantillon
Situation cible	Type de zone planifiée	Zone à 30 km/h dégagée, zone à 30 km/h étroite, tronçon à 30 km/h
	Vitesse cible	Vitesse moyenne pronostiquée ( $V_{Q50}$ ) dans une situation avec limitation de vitesse à 30 km/h
	Vitesse cible <i>worst-case</i>	Vitesse maximale moyenne prévisible lorsque la vitesse cible est dépassée, pour estimer l'impact minimum

Le **Tableau 27** présente un exemple d'évaluation de l'impact acoustique des réductions de vitesse.

**Tableau 27 : Exemple d'impact acoustique dans une situation où une limitation de vitesse à 30 km/h est envisagée en comparaison avec une situation initiale avec une vitesse moyenne de 50 km/h.**

Étape	Description succincte	Voir paragraphe	Exemple
1	Choix de la situation cible	<b>2.3.1</b>	Type de zone : Tronçon à 30 km/h
2	Détermination de la réduction de bruit obtenue avec vitesse cible moyenne pronostiquée compte-tenu de la proportion de camions	<b>3.3.3</b> <b>Figure 19</b>	Impact acoustique à 30 km/h avec 2% de camions : -4.0 dB
3	Détermination de l'impact supplémentaire obtenu avec un remplacement du revêtement routier	<b>3.3.5</b> <b>Tableau 22</b> à <b>Tableau 25</b>	Impact acoustique supplémentaire dû au revêtement avec la pose d'un revêtement avec $KB_{Misch-1}$ : 41%, c.-à-d. $-1 \text{ dB} * 0.41 \approx -0.4 \text{ dB}$
4	Gestion de la différence jour / nuit : en cas d'écart dans la composition du trafic ou la vitesse, évaluer séparément le jour et la nuit		Effet de la limitation de vitesse à 30 km/h : - Jour : $-4.0 \text{ dB} + -0.4 \text{ dB} = -4.4 \text{ dB}$ - Nuit : au besoin, répéter les étapes 1 à 3 en adaptant les paramètres
5	Estimation de l'impact acoustique lorsque la vitesse ciblée n'est pas atteinte		Répéter les étapes 1 à 3 en adaptant les paramètres. L'impact d'une vitesse moyenne de 36 km/h serait inférieur de 1.1 dB ( $-2.9 \text{ dB} + -0.4 \text{ dB} = -3.3 \text{ dB}$ )



## Annexes

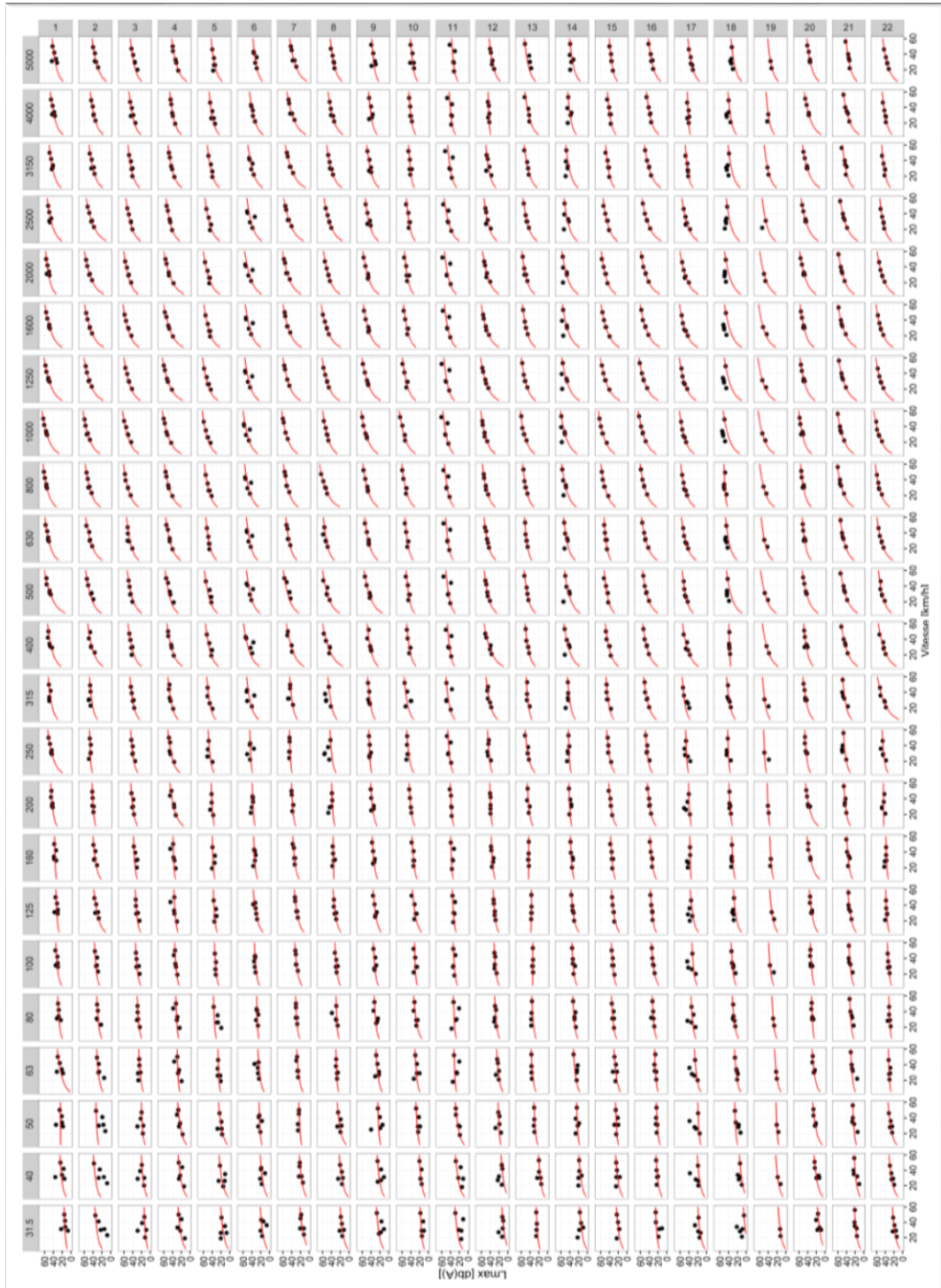
<b>I</b>	<b>Formules d'émission .....</b>	<b>69</b>
<b>I.1</b>	<b>Modèle du bruit de roulement VT .....</b>	<b>69</b>
<b>I.2</b>	<b>Modèle du bruit de propulsion VT .....</b>	<b>70</b>
<b>I.3</b>	<b>Relation vitesse de rotation du moteur-niveau sonore.....</b>	<b>71</b>
<b>I.4</b>	<b>Coefficients de modèle du bruit de roulement et de propulsion VT.....</b>	<b>72</b>
<b>I.5</b>	<b>Coefficients de modèle pour camions .....</b>	<b>83</b>
<b>I.6</b>	<b>Coefficients de modèle du bruit de roulement spécifiques pour les différentes catégories de pneus .....</b>	<b>84</b>
<b>II</b>	<b>Détails des campagnes de mesurages.....</b>	<b>87</b>
<b>II.1</b>	<b>Détails des lieux de collecte des données (relevés statistiques des comportements de conduite).....</b>	<b>87</b>
<b>II.2</b>	<b>Plan détaillé du circuit utilisé pour la campagne de mesurages dans le domaine des basses vitesses .....</b>	<b>90</b>
<b>II.3</b>	<b>Données des véhicules testés lors de la campagne de mesurages dans le domaine des basses vitesses.....</b>	<b>91</b>
<b>II.4</b>	<b>Conditions atmosphériques durant la campagne de mesurages dans le domaine des basses vitesses .....</b>	<b>92</b>
<b>III</b>	<b>Estimation approximative de l'influence des pneus .....</b>	<b>93</b>





# I Formules d'émission

## I.1 Modèle du bruit de roulement VT



**Figure 1 :** Émissions du bruit de roulement et modèles du bruit de roulement par véhicule et fréquence.

## I.2 Modèle du bruit de propulsion VT

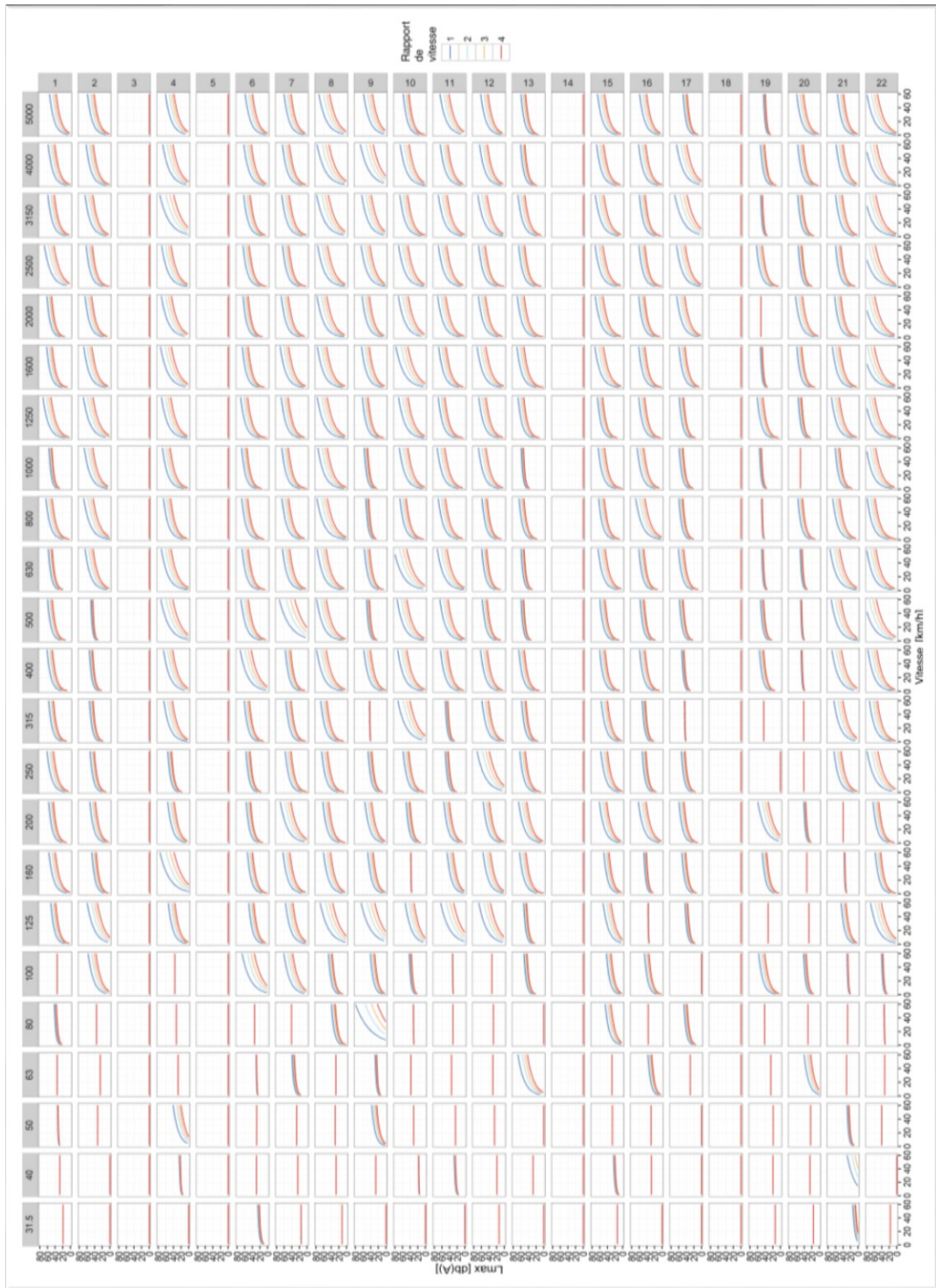


Figure 2 : Modèle du bruit de propulsion par rapport de vitesse, véhicule et fréquence.

### I.3

## Relation vitesse de rotation du moteur-niveau sonore

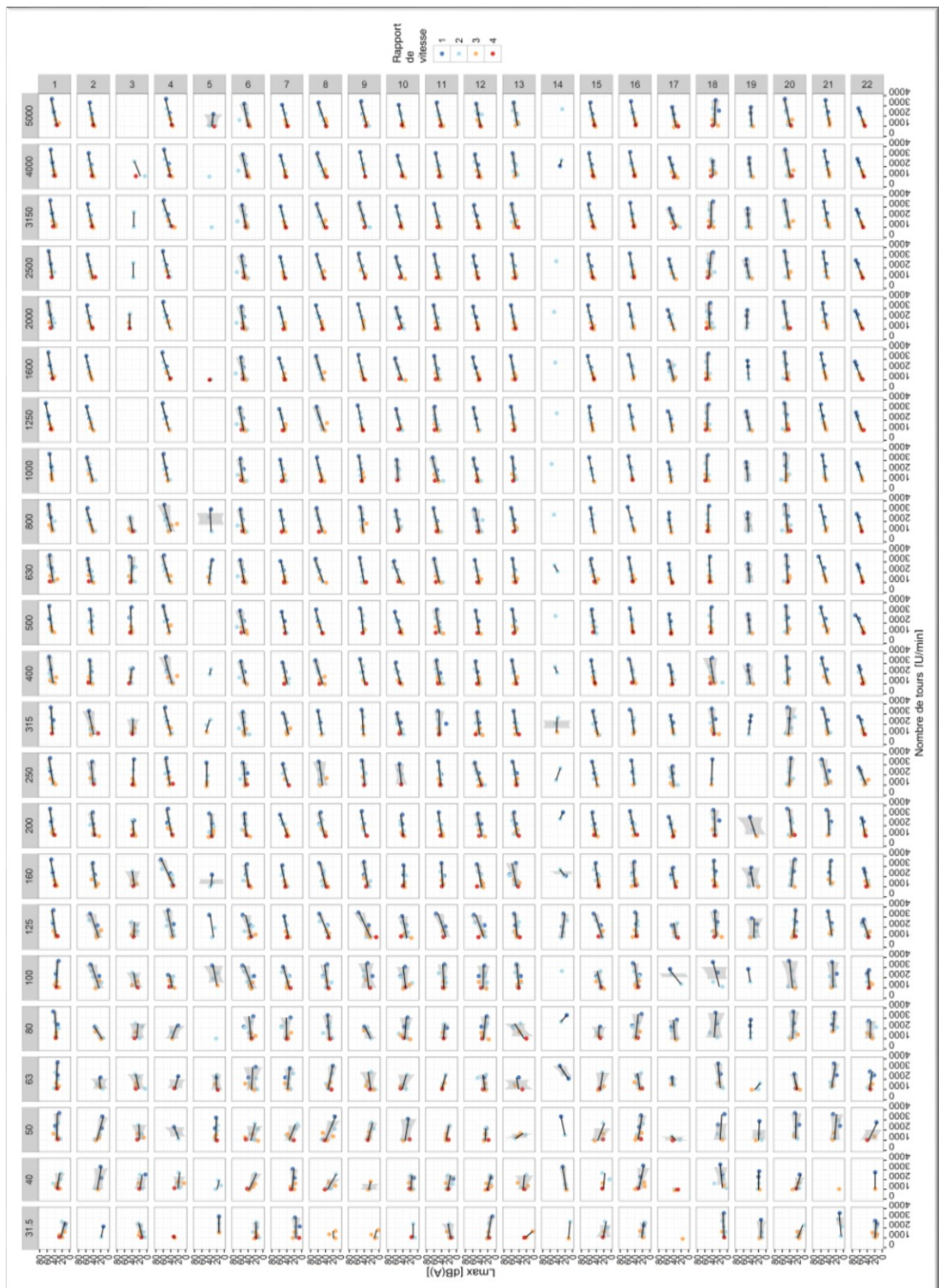


Figure 3 : Relation vitesse de rotation du moteur-niveau sonore par véhicule et fréquence.



## I.4 Coefficients de modèle du bruit de roulement et de propulsion VT

**Tableau 1 : Coefficients de modèle du bruit de roulement et de propulsion pour les voitures de tourisme en bande de tiers d'octave.**

En gris – coefficients du bruit de propulsion pour les véhicules hybrides

En gris clair – Coefficients du bruit de propulsion pour les véhicules électriques

Véh.	Fréquence	$a_{\text{Roll: VT, Fz, f}}$	$b_{\text{Roll: VT, Fz, f}}$	$a_{\text{Antr: VT, Fz, f}}$	$b_{\text{Antr: VT, Fz, f}}$
1	31.5	3.85	6.58	19.0468	0
1	40	1.57	13.19	27.6234	0
1	50	23.24	0.4	24.1746	2.56367
1	63	-17.05	27.13	34.5321	0
1	80	12.64	9.85	9.50262	8.62931
1	100	12.31	12.69	34.4733	0
1	125	21.38	7.36	-25.8002	20.4397
1	160	30.59	3.75	-43.9765	26.5905
1	200	22.27	13.49	-17.001	19.5969
1	250	-1.73	30.72	-38.8645	26.5631
1	315	15.43	20.49	-17.8866	19.8263
1	400	2.88	28.51	-22.3199	22.132
1	500	-18.19	44.24	-14.3599	19.6922
1	630	8.39	28.7	-2.97995	16.1298
1	800	12.78	28.65	-32.101	25.5355
1	1000	0.7	36.73	10.0916	12.1889
1	1250	-7.1	38.51	-52.195	32.8656
1	1600	-5.71	36.57	-25.0333	23.1479
1	2000	17.85	22.35	-13.1709	19.8193
1	2500	-0.67	30.9	-79.7056	39.1765
1	3150	4.61	25.24	-42.4096	26.8728
1	4000	-0.75	26.77	-45.2197	27.404
1	5000	1.74	23.12	-49.4229	27.5603
2	31.5	8.78	15.36	0	0
2	40	11.53	15.77	0	0
2	50	22.63	6.33	31.8094	0
2	63	8	13.62	25.0139	0
2	80	12.84	10.59	34.5131	0
2	100	17.6	10.89	-64.6386	32.1954
2	125	-6.23	25.2	-99.1568	41.9942
2	160	9.75	17.16	-21.3847	18.1563
2	200	27.92	8.24	-34.4224	23.0234
2	250	37.59	5.94	-14.9267	17.708
2	315	18.5	16.74	-4.01758	15.2897
2	400	-5.25	32.5	3.06084	13.4621
2	500	-1.93	33.16	20.0789	7.88208
2	630	-5.22	34.97	-58.1078	32.6032
2	800	0.53	32.36	-76.6603	38.4087
2	1000	-0.92	36.04	-64.2504	34.7744
2	1250	-11.38	40.6	-78.797	39.2261
2	1600	-12.46	40.35	-55.3059	32.7103
2	2000	-12.58	40.74	-37.9957	27.307
2	2500	-20.54	43.08	-33.1387	25.2144
2	3150	-1.94	28.79	-55.6905	31.9685
2	4000	-2.25	27.32	-48.1278	29.1858
2	5000	-11.74	30.5	-44.7763	27.3774

Véh.	Fréquence	$a_{\text{Roll: VT.Fz.f}}$	$b_{\text{Roll: VT.Fz.f}}$	$a_{\text{Antr: VT.Fz.f}}$	$b_{\text{Antr: VT.Fz.f}}$
3	31.5	-0.46	8.42	0	0
3	40	-2.53	13.19	0	0
3	50	6.12	8.37	0	0
3	63	8.37	10.28	0	0
3	80	13.46	9.38	0	0
3	100	14.04	11.23	0	0
3	125	14.55	11.27	0	0
3	160	24.14	8.05	0	0
3	200	18.73	14.59	0	0
3	250	17.97	15.14	0	0
3	315	10.25	20.49	0	0
3	400	0.4	28.51	0	0
3	500	-1.42	30.55	0	0
3	630	8.08	26.03	0	0
3	800	4.58	31.98	0	0
3	1000	2.3	34.44	0	0
3	1250	-1.35	34.76	0	0
3	1600	1.24	34.47	0	0
3	2000	6.61	30.4	0	0
3	2500	0.9	30.9	0	0
3	3150	7.28	24.68	0	0
3	4000	4.09	25.07	0	0
3	5000	3.03	23.99	0	0
4	31.5	-1.83	16.49	0	0
4	40	-7.34	19.49	8.94745	4.24034
4	50	-6.24	19.49	-80.7322	32.2004
4	63	19.4	5.71	27.7692	0
4	80	21.61	6.12	32.2474	0
4	100	18.47	9.34	36.2206	0
4	125	21.95	8.22	-48.4656	27.0312
4	160	29.27	5.45	-143.636	58.0077
4	200	-5.17	28.92	-46.0129	26.7694
4	250	5.64	25.45	-3.95132	15.6024
4	315	11.47	22.13	-66.7884	34.9863
4	400	-5.91	33.14	-74.7688	37.3154
4	500	7.44	27.74	-112.365	49.1328
4	630	0.22	31.14	-76.7455	39.2971
4	800	-4.46	35.68	-44.247	29.2698
4	1000	-6.93	39.63	-50.2445	31.5541
4	1250	-13.44	43.32	-71.5142	37.8694
4	1600	-14.55	42.16	-93.0454	44.2268
4	2000	-15.83	42.55	-82.8752	40.9361
4	2500	3.3	29.02	-72.3478	37.9472
4	3150	-1.97	29.52	-138.812	56.7985
4	4000	2.89	24.56	-89.1867	41.6748
4	5000	-14.59	31.98	-70.5128	34.8613

Véh.	Fréquence	$a_{\text{Roll: VT,Fz,f}}$	$b_{\text{Roll: VT,Fz,f}}$	$a_{\text{Antr: VT,Fz,f}}$	$b_{\text{Antr: VT,Fz,f}}$
5	31.5	-8.54	16.49	0	0
5	40	-9.98	19.49	0	0
5	50	-8.9	19.49	0	0
5	63	17.13	5.71	0	0
5	80	26.42	6.12	0	0
5	100	18.46	9.34	0	0
5	125	22.98	8.22	0	0
5	160	30.34	5.45	0	0
5	200	29.77	7.11	0	0
5	250	26.87	12.75	0	0
5	315	18.36	19.34	0	0
5	400	6.84	27.38	0	0
5	500	8.47	27.74	0	0
5	630	13.83	23.12	0	0
5	800	8.95	27.6	0	0
5	1000	7.74	31.06	0	0
5	1250	4.25	32.73	0	0
5	1600	-0.45	33.59	0	0
5	2000	-1.31	34.71	0	0
5	2500	1.25	31.25	0	0
5	3150	5.5	25.89	0	0
5	4000	8.32	21.98	0	0
5	5000	0.81	23.63	0	0
6	31.5	-6.09	15.36	-0.716811	7.04975
6	40	-6.82	15.77	29.149	0
6	50	12.77	6.33	28.3898	0
6	63	2.65	13.62	22.0383	2.17576
6	80	21.68	4.22	34.1932	0
6	100	15.27	10.89	-124.052	50.6341
6	125	-0.57	21.4	-30.3345	21.1687
6	160	21.81	8.09	-28.3658	21.5711
6	200	28.8	5.99	-12.3575	18.1817
6	250	34.49	5.94	-6.12409	16.6292
6	315	7.07	25.46	-18.8456	21.2148
6	400	-0.34	33.52	-98.8966	45.2355
6	500	1.47	28.83	-44.6788	30.3801
6	630	10.48	23.79	-29.2561	25.5145
6	800	4.78	29.31	-24.8742	24.5813
6	1000	5.12	31.08	-14.2752	21.8227
6	1250	2.55	30.31	-37.3031	28.6336
6	1600	-3.03	32.86	-26.0249	24.5164
6	2000	-6.79	35.75	-16.6999	21.5537
6	2500	-4.77	31.84	-31.6612	25.5117
6	3150	-6.88	31.86	-38.0924	26.7326
6	4000	-6.17	29.35	-54.001	30.8331
6	5000	1.87	20.21	-55.4986	30.2642

Véh.	Fréquence	$a_{\text{Roll: VT, Fz, f}}$	$b_{\text{Roll: VT, Fz, f}}$	$a_{\text{Antr: VT, Fz, f}}$	$b_{\text{Antr: VT, Fz, f}}$
7	31.5	-14.84	20.39	14.785	0.228475
7	40	-5.33	15.77	24.3285	0
7	50	12.53	6.33	27.0418	0
7	63	4.45	13.62	1.75357	10.0528
7	80	15.64	8.82	40.7668	0
7	100	5.94	15.32	-75.8724	36.2283
7	125	-2.95	20.97	-57.4205	30.1879
7	160	13.41	13.59	-43.4557	28.2564
7	200	25	8.67	-90.5791	42.5625
7	250	34.83	5.94	-32.1954	23.6871
7	315	15.03	16.74	-26.1228	21.6405
7	400	-14.19	37.37	-25.349	21.8308
7	500	0.2	33.16	-168.713	63.9985
7	630	11.65	23.53	-46.9779	29.5529
7	800	3.64	31.08	-39.0763	27.8401
7	1000	2.82	33.77	-35.8926	27.0801
7	1250	-5.51	36.8	-40.3275	28.63
7	1600	-9.2	38.72	-60.3106	34.649
7	2000	-8.68	39.16	-40.7278	28.7233
7	2500	-16.73	42.15	-32.6094	25.6748
7	3150	-22.39	43.34	-49.1698	30.5956
7	4000	-20.33	40.14	-44.1016	28.8402
7	5000	-20.58	36.95	-49.3805	29.071
8	31.5	-9.1	16.49	11.6215	0
8	40	-12.32	19.49	27.166	0
8	50	-7.65	19.49	29.7627	0
8	63	19.66	5.71	27.8815	0
8	80	18.7	6.12	-20.9164	16.0455
8	100	11.53	11.61	-12.7654	15.9626
8	125	6.33	16.99	-124.817	51.3486
8	160	33.66	1.27	-49.2512	29.0393
8	200	27.12	7.11	-30.4344	24.5464
8	250	20.85	12.75	-27.1415	24.5086
8	315	13.6	19.34	-27.587	25.2055
8	400	-16.47	43.05	-69.1629	39.0155
8	500	-4.14	36.25	-70.0117	39.2377
8	630	17.32	23.12	-61.5648	36.6659
8	800	-8.92	42.89	-83.5736	42.6871
8	1000	5.22	30.63	-70.3342	38.5037
8	1250	-3.73	36.69	-77.1591	40.7625
8	1600	-9.97	41.29	-65.7632	37.6409
8	2000	-3.67	34.66	-74.9555	40.3463
8	2500	-12.31	38.87	-77.2755	40.4795
8	3150	-6.83	32.47	-102.609	47.8874
8	4000	-8.18	31.48	-107.903	49.0506
8	5000	-1.91	25.21	-93.0303	43.8538

Véh.	Fréquence	$a_{\text{Roll: VT,Fz,f}}$	$b_{\text{Roll: VT,Fz,f}}$	$a_{\text{Antr: VT,Fz,f}}$	$b_{\text{Antr: VT,Fz,f}}$
9	31.5	0.62	15.36	0	0
9	40	-1.71	15.77	26.7633	0
9	50	13.85	6.33	-38.1187	19.9519
9	63	5.15	13.62	3.79599	6.5714
9	80	14.24	10.59	-262.379	90.7201
9	100	15.91	10.89	-26.6967	17.9475
9	125	4.65	17.38	-146.078	55.9483
9	160	16.65	11.78	-35.9867	22.1894
9	200	16.79	13.67	-49.0647	27.6475
9	250	34.7	5.94	-12.1065	15.6251
9	315	18.42	16.74	37.8303	1.46531
9	400	7.33	23.54	-45.3637	27.3391
9	500	-13.12	39.07	6.77261	11.6962
9	630	4.47	28.48	-23.1302	21.1189
9	800	1.64	32.17	8.25468	11.7839
9	1000	-1.35	36.24	3.99953	14.0482
9	1250	-8.55	39.15	-27.2266	23.6402
9	1600	-4.35	35.08	-54.6876	31.4705
9	2000	-1.36	33.73	-50.2403	29.9204
9	2500	3.8	28.02	-71.8036	36.3176
9	3150	3.61	26.05	-84.672	39.2773
9	4000	13.43	18.18	-131.152	52.5009
9	5000	12.38	14.82	-77.3601	35.9795
10	31.5	3.71	8.42	0	0
10	40	-2.33	13.19	13.6731	1.17433
10	50	13.57	8.37	30.8826	0
10	63	12.33	10.28	37.7651	0
10	80	2.04	17.73	28.5802	0.841259
10	100	21.69	5.63	8.92453	8.86235
10	125	1.34	19.84	-83.5873	36.1453
10	160	17.94	10.91	33.7733	1.23353
10	200	21.79	12.55	-9.97531	16.0525
10	250	22.66	15.14	-28.0615	22.9021
10	315	19.14	20.49	-114.089	49.3458
10	400	14.26	19.88	-68.1457	37.2857
10	500	18.68	18.02	-76.1334	39.8459
10	630	21.58	18.04	-114.747	52.3036
10	800	11.67	27.64	-30.6397	25.8149
10	1000	5.41	34.44	-62.109	34.5689
10	1250	8.96	28.38	-73.321	38.0461
10	1600	10.15	26.34	-106.611	48.7191
10	2000	18.9	20.23	-81.1754	40.2971
10	2500	16.83	18.77	-72.6972	37.875
10	3150	23.19	12.39	-52.4985	31.634
10	4000	18.34	14.81	-72.627	36.7774
10	5000	13.59	15.38	-31.2863	23.6788



Véh.	Fréquence	$a_{\text{Roll: VT, Fz, f}}$	$b_{\text{Roll: VT, Fz, f}}$	$a_{\text{Antr: VT, Fz, f}}$	$b_{\text{Antr: VT, Fz, f}}$
11	31.5	0.94	16.49	0	0
11	40	-5.53	19.49	9.0107	5.04172
11	50	-5.36	19.49	24.7939	0
11	63	22.23	5.71	34.8305	0
11	80	22.69	6.12	31.2877	0
11	100	17.73	9.34	28.4262	1.0688
11	125	21.49	8.22	-137.635	53.248
11	160	30.06	5.45	-47.2772	24.8916
11	200	26.44	8.26	-31.2329	22.865
11	250	25.26	12.04	3.66669	12.6717
11	315	16.31	19.34	11.9187	10.4908
11	400	19.82	15.46	-42.7869	28.302
11	500	15.54	19.79	-61.5585	33.6898
11	630	22.41	16.22	-76.8167	39.5524
11	800	17.7	20.38	-42.9911	29.8752
11	1000	16.41	23.13	-46.5408	31.5483
11	1250	15.64	22.42	-32.9326	27.194
11	1600	9.04	25.38	-45.649	30.3004
11	2000	9.43	25.13	-54.6851	33.3695
11	2500	-1.09	31.39	-58.0266	33.7861
11	3150	12.26	19.44	-64.511	35.5209
11	4000	19.22	13.62	-52.9214	31.144
11	5000	14.05	13.28	-75.8899	37.4431
12	31.5	-13.38	15.36	13.6042	0
12	40	-12.51	15.77	19.2784	0
12	50	11.12	6.33	25.7826	0
12	63	1.5	13.62	29.9689	0
12	80	11.38	10.59	28.3537	0
12	100	12.23	10.89	32.4634	0
12	125	12.86	11.66	-114.011	47.8935
12	160	23.32	8.2	-58.6687	30.3291
12	200	30.63	5.99	-42.4566	25.9313
12	250	28.07	10.3	-118.892	50.426
12	315	6.18	24.53	-43.5492	27.0538
12	400	-18.33	40.92	-41.4171	27.4913
12	500	6.15	26.89	-18.5882	20.2472
12	630	10.04	24.83	-17.7652	20.4
12	800	9.51	27.34	-21.2443	21.1132
12	1000	7.32	30.7	-48.5481	30.7923
12	1250	-6.35	38.59	-44.5446	29.5408
12	1600	-5.61	37.29	-64.6082	36.0127
12	2000	-3.6	34.45	-42.9777	29.3477
12	2500	5.33	27.64	-37.0051	27.6573
12	3150	11.95	21.65	-70.9355	37.1893
12	4000	35.24	5.59	-55.3629	31.8369
12	5000	0.72	23.65	-50.5713	29.765

Véh.	Fréquence	$a_{\text{Roll: VT,Fz,f}}$	$b_{\text{Roll: VT,Fz,f}}$	$a_{\text{Antr: VT,Fz,f}}$	$b_{\text{Antr: VT,Fz,f}}$
13	31.5	11.19	8.42	0	0
13	40	-2.89	13.19	28.0605	0
13	50	16.28	8.37	0	0
13	63	19.24	10.28	-79.1236	38.9106
13	80	19.4	9.38	0	0
13	100	34.2	-0.34	3.42312	12.8732
13	125	38.77	-1.25	5.92805	12.4396
13	160	43.37	-0.1	-35.3744	26.1775
13	200	24.9	12.1	-59.5723	33.2638
13	250	13.5	21.27	-23.7322	22.9653
13	315	26.27	12.74	-9.97582	18.0693
13	400	12.48	21.94	-20.3856	22.7464
13	500	11.07	23.79	17.2507	11.2557
13	630	24.86	15.56	11.8431	12.6592
13	800	14.7	23.67	-10.088	19.8617
13	1000	7.73	30.78	23.9682	9.31789
13	1250	6.28	30.12	-21.7873	23.6347
13	1600	8.38	27.57	-39.0985	28.9888
13	2000	10.36	27.08	-37.5167	28.3174
13	2500	3.06	29.67	-28.0043	24.8682
13	3150	4.3	27.57	-39.6329	28.4213
13	4000	1.13	28.42	-6.82586	17.9455
13	5000	10.26	23.99	-12.9027	19.2518
14	31.5	-9.67	15.36	0	0
14	40	-8.6	15.77	0	0
14	50	13.19	6.33	0	0
14	63	7.75	13.62	0	0
14	80	14.23	10.59	0	0
14	100	15.86	10.89	0	0
14	125	6.7	17.22	0	0
14	160	24.24	8.09	0	0
14	200	31.38	5.99	0	0
14	250	32.62	5.94	0	0
14	315	15.47	16.74	0	0
14	400	-6.27	33.52	0	0
14	500	-6.84	33.16	0	0
14	630	10.52	24.47	0	0
14	800	2.78	31.38	0	0
14	1000	-1.21	35.02	0	0
14	1250	-8.03	37.14	0	0
14	1600	-7.87	36.51	0	0
14	2000	-3.6	34.51	0	0
14	2500	2.76	28.43	0	0
14	3150	2.9	26.05	0	0
14	4000	12.22	18.18	0	0
14	5000	0.09	22.6	0	0

Véh.	Fréquence	$a_{\text{Roll: VT, Fz, f}}$	$b_{\text{Roll: VT, Fz, f}}$	$a_{\text{Antr: VT, Fz, f}}$	$b_{\text{Antr: VT, Fz, f}}$
15	31.5	-2.83	15.36	13.9068	0
15	40	-2.08	15.77	0.41282	6.27907
15	50	14.97	6.33	26.8019	0
15	63	5.44	13.62	27.8831	0
15	80	16.5	10.59	-44.7831	24.043
15	100	16.41	10.89	-30.9239	19.4733
15	125	4.89	17.22	-71.4504	32.5479
15	160	19.15	10.23	-32.1957	21.6374
15	200	11.6	17.03	-50.3537	29.4876
15	250	15.35	17.43	-43.6435	26.6879
15	315	18.2	16.74	-40.8071	25.7193
15	400	0.17	27.95	-23.1586	22.1109
15	500	12.42	22.37	-19.6364	21.0309
15	630	25.98	14.97	-45.548	29.1679
15	800	3.94	31.38	-24.2497	23.0832
15	1000	3.24	35.02	-35.261	26.3419
15	1250	-12.35	41.26	-16.0901	21.7575
15	1600	-9.47	38.67	-60.4657	35.3215
15	2000	3.59	31	-48.352	31.8375
15	2500	0.69	30.41	-49.9176	32.3582
15	3150	14.57	19.16	-59.6663	34.7806
15	4000	12.2	18.3	-41.8498	29.1878
15	5000	9.54	17.42	-45.407	29.4964
16	31.5	10.78	8.42	0	0
16	40	1.29	13.19	27.9468	0
16	50	9	8.37	28.831	0
16	63	14.41	7.47	-22.3543	15.7904
16	80	16.48	9.38	36.3224	0
16	100	6.41	16.16	-23.8372	18.5802
16	125	14.93	12.53	31.8503	1.3493
16	160	13.51	13.92	8.31285	10.4386
16	200	11.06	18.67	-56.4032	31.4574
16	250	21.96	15.14	-6.36958	15.5499
16	315	4.66	27.03	3.66929	12.8409
16	400	-1.86	31.98	-24.1463	21.9788
16	500	-2.6	32.69	-5.10174	16.6099
16	630	-1.79	33.45	-16.8154	20.6226
16	800	-1	34.92	-72.3206	37.45
16	1000	-1.91	37.67	-37.1577	27.1768
16	1250	-9.79	41.45	-30.7119	24.3874
16	1600	-13.6	41.79	-33.7389	25.1777
16	2000	-12.03	40.32	-27.4148	23.4758
16	2500	-16.56	41.19	-32.7348	24.7912
16	3150	-11.13	34.85	-29.6117	23.6044
16	4000	-0.13	26.12	-47.748	28.9984
16	5000	-5.13	26.46	-48.8045	28.5287

Véh.	Fréquence	$a_{\text{Roll: VT, Fz, f}}$	$b_{\text{Roll: VT, Fz, f}}$	$a_{\text{Antr: VT, Fz, f}}$	$b_{\text{Antr: VT, Fz, f}}$
17	31.5	-7.44	15.36	0	0
17	40	-6.93	15.77	0	0
17	50	8.54	6.33	0	0
17	63	3.18	13.62	29.7112	0
17	80	16.44	10.59	-3.87915	13.3092
17	100	13.9	10.89	0	0
17	125	6.35	17.22	0.933202	11.2692
17	160	32.65	2.93	-10.1013	16.4119
17	200	30.29	5.99	-18.2	20.4938
17	250	36.89	5.94	-5.56027	15.5344
17	315	25.68	16.74	38.1188	1.82714
17	400	-5.2	33.67	15.8108	9.58151
17	500	13.01	23.85	1.78159	14.853
17	630	1.94	31.09	-21.4234	21.762
17	800	5.39	30.14	-1.95867	16.2188
17	1000	6.21	31.25	-0.492034	15.649
17	1250	-1.47	35.77	-8.99586	17.8626
17	1600	-6.75	38.5	-34.5647	24.8934
17	2000	-7.7	38.35	-58.542	32.7577
17	2500	-5.02	34.46	-69.5648	35.7743
17	3150	19.41	16.29	-120.569	50.5438
17	4000	32.13	6.5	-91.295	41.5574
17	5000	-1.82	24.95	-14.2375	16.5947
18	31.5	-20.79	15.36	0	0
18	40	-12.64	15.77	0	0
18	50	15.03	6.33	0	0
18	63	2.58	13.62	0	0
18	80	7.58	13.69	0	0
18	100	15.03	10.89	0	0
18	125	-1.19	17.22	0	0
18	160	18.83	8.09	0	0
18	200	25.72	7.6	0	0
18	250	31.89	5.94	0	0
18	315	10.87	19.13	0	0
18	400	32.23	3.99	0	0
18	500	-13.74	33.16	0	0
18	630	3.78	24.47	0	0
18	800	37.53	7.47	0	0
18	1000	-9.63	35.02	0	0
18	1250	-15.91	37.14	0	0
18	1600	-15.37	36.51	0	0
18	2000	-11.81	34.51	0	0
18	2500	-4.92	28.43	0	0
18	3150	-4.73	26.05	0	0
18	4000	9.29	18.18	0	0
18	5000	-5.43	22.6	0	0

Véh.	Fréquence	$a_{\text{Roll: VT, Fz, f}}$	$b_{\text{Roll: VT, Fz, f}}$	$a_{\text{Antr: VT, Fz, f}}$	$b_{\text{Antr: VT, Fz, f}}$
19	31.5	-9.56	15.36	13.5197	0
19	40	-4.65	15.77	19.5697	0
19	50	11.53	6.33	19.0786	0
19	63	1.79	13.62	25.1314	0
19	80	13.24	10.59	41.5798	0.0159431
19	100	20	10.89	-37.9824	25.2001
19	125	6.46	17.22	32.1412	0
19	160	22.36	8.09	-21.6254	18.3676
19	200	32.06	5.99	-100.518	42.3509
19	250	40.08	5.94	0	0
19	315	23.67	16.74	43.7008	0
19	400	-5.87	33.52	-9.80837	17.2098
19	500	-1.24	33.16	5.03166	12.5213
19	630	12.77	24.47	25.8173	6.24283
19	800	4.21	31.38	37.5168	3.21654
19	1000	1.47	35.02	24.1261	8.14429
19	1250	-1.87	37.14	-27.4006	23.3728
19	1600	-2.39	36.51	22.457	7.97084
19	2000	-1.65	34.51	51.0353	0
19	2500	3.71	28.43	-28.8651	24.3278
19	3150	3.14	26.05	23.8722	7.40144
19	4000	13.11	18.18	-12.7632	17.2955
19	5000	1.35	22.6	14.0125	8.08204
20	31.5	-11.99	16.49	15.6723	0
20	40	-9.3	19.49	24.8163	0
20	50	-8.75	20.94	23.5009	0
20	63	-0.7	17.35	-62.9718	27.4535
20	80	20.22	6.12	30.0148	0
20	100	17.74	9.34	-1.86391	11.6673
20	125	2.28	19.2	27.6995	0
20	160	-7.05	27.43	33.3419	0
20	200	-4.24	28.01	9.40243	8.48051
20	250	24.6	12.75	41.4335	0
20	315	9.74	23.3	41.4832	0
20	400	12.14	21.1	32.3977	4.36722
20	500	-8.38	34.62	33.3772	4.40915
20	630	18.23	19.55	19.6527	8.35481
20	800	15.8	23.08	-15.489	19.2282
20	1000	11.55	27.74	50.3234	0
20	1250	0.13	32.64	3.63989	13.9459
20	1600	4.24	30.14	-16.9625	20.3935
20	2000	-4.07	35.43	-46.2964	29.1149
20	2500	-10.97	37.44	-3.11756	15.7263
20	3150	-14.64	37.72	-10.931	18.1592
20	4000	-17.25	36.8	-27.3881	22.4843
20	5000	-5.12	26.66	-44.9214	27.8789

Véh.	Fréquence	$a_{\text{Roll: VT, Fz, f}}$	$b_{\text{Roll: VT, Fz, f}}$	$a_{\text{Antr: VT, Fz, f}}$	$b_{\text{Antr: VT, Fz, f}}$
21	31.5	-2.37	13.84	-32.0513	12.2853
21	40	-0.98	13.19	-142.012	45.2963
21	50	11	8.37	-1.05596	8.00704
21	63	12.37	10.28	30.7225	0
21	80	16.45	9.38	27.8201	0
21	100	14.86	11.23	14.6683	3.9445
21	125	4.64	18.38	-32.7861	20.6751
21	160	17.25	12.6	25.3563	3.12018
21	200	20.95	14.59	39.5394	0
21	250	20.84	15.14	-47.9059	29.7114
21	315	13.25	20.49	-78.2748	37.825
21	400	-11.65	36.29	-79.9037	39.6478
21	500	-12.47	37.74	-80.5144	40.3191
21	630	0.98	30.7	-77.0763	40.2563
21	800	-1.48	35.84	-42.4854	29.1363
21	1000	-2.98	36.56	-11.022	19.0801
21	1250	-12.14	40.21	-51.1018	32.3231
21	1600	-12.25	40.9	-46.7214	30.5103
21	2000	-2.3	34.89	-35.124	25.8594
21	2500	-13.88	39.28	-22.9582	21.9661
21	3150	5.92	24.69	-44.6596	27.6873
21	4000	-14.38	35.15	-51.4942	29.1497
21	5000	-1.78	24.44	-41.9453	25.6899
22	31.5	-5.35	16.49	17.0205	0
22	40	-2.84	19.49	0	0
22	50	-0.53	19.49	40.3816	0
22	63	23.08	5.71	32.0985	0
22	80	21.36	6.12	28.5516	1.47977
22	100	19.01	9.34	15.7995	6.68001
22	125	25.07	8.22	-100.892	45.2638
22	160	29.39	5.45	-29.0819	22.9215
22	200	43.1	0.96	-26.6049	23.875
22	250	25.3	12.75	-91.0188	45.1261
22	315	-23.74	46.41	-51.92	33.0955
22	400	-12.82	39.07	-63.6381	37.2094
22	500	5.23	28.81	-108.477	51.9922
22	630	-0.75	34.23	-65.1184	38.5147
22	800	8.32	31.26	-44.5249	32.6943
22	1000	-2.56	39.17	-66.1116	39.0611
22	1250	-6.79	39.12	-67.0509	40.2959
22	1600	-3.89	37.19	-92.2682	48.5827
22	2000	-8.05	38.02	-85.1539	45.9157
22	2500	8.12	25.47	-99.2326	49.7988
22	3150	14.9	19.06	-91.0789	46.8827
22	4000	9.28	21.49	-91.6722	46.472
22	5000	-10.58	32.09	-86.1998	43.9908

**Tableau 2 : Coefficient de modèle du bruit de propulsion selon rapport de vitesse.**

Rapport de vitesse	$C_{\text{Antr: Gang}} [\text{km/h}]$
1	0.00
2	8.33
3	17.33
4	30.00

## I.5

## Coefficients de modèle pour camions

**Tableau 3:** Coefficients de modèle pour les bruits de propulsion et de roulement en bandes d'octave, calculés par CNOSSOS [23] pour la catégorie de véhicules « heavy vehicles ».

Fréquence	$a_{\text{Roll: LKW}, f_{\text{Okt}}}$	$b_{\text{Roll: LKW}, f_{\text{Okt}}}$	$a_{\text{Antr: LKW}, f_{\text{Okt}}}$	$b_{\text{Antr: LKW}, f_{\text{Okt}}}$
63	87.0	30.0	104.4	0.0
125	91.7	33.5	100.6	3.0
250	94.1	31.3	101.7	4.6
500	100.7	25.4	101.0	5.0
1000	100.8	31.8	100.1	5.0
2000	94.3	37.1	95.9	5.0
4000	87.1	38.6	91.3	5.0
8000	82.5	40.6	85.3	5.0

## I.6 Coefficients de modèle du bruit de roulement spécifiques pour les différentes catégories de pneus

**Tableau 4:** Coefficients de modèle pour les modèles du bruit du roulement spécifiques des différentes catégories de pneus.

Catégorie de pneus	Fréquence	$a_{\text{Roll: VT, RKat, f}}$	$b_{\text{Roll: VT, RKat, f}}$
1	31.5	-5.87657	15.3691
1	40	-4.40345	15.7704
1	50	12.9963	6.3349
1	63	4.96672	13.6224
1	80	13.1394	10.5936
1	100	14.8172	10.8962
1	125	4.88249	17.2262
1	160	22.6487	8.09991
1	200	29.8629	5.99852
1	250	35.0639	5.94484
1	315	19.4247	16.7482
1	400	-7.27503	33.5218
1	500	-3.8008	33.1653
1	630	10.576	24.4798
1	800	2.9115	31.3801
1	1000	0.80465	35.022
1	1250	-5.78876	37.1484
1	1600	-6.20165	36.5172
1	2000	-2.77144	34.5148
1	2500	3.37207	28.4395
1	3150	3.60785	26.0556
1	4000	13.1439	18.1843
1	5000	0.846081	22.6096
2	31.5	-6.89846	16.4926
2	40	-9.27658	19.4988
2	50	-5.45681	19.4934
2	63	19.2754	5.71501
2	80	20.9187	6.12795
2	100	17.7845	9.34635
2	125	21.8207	8.22496
2	160	28.7106	5.45763
2	200	29.8806	7.11757
2	250	26.0107	12.7533
2	315	16.7944	19.3445
2	400	3.73814	27.3861
2	500	5.22931	27.742
2	630	14.3644	23.121
2	800	10.2491	27.6062
2	1000	6.19675	31.0664
2	1250	1.53716	32.7355
2	1600	-0.576883	33.5907
2	2000	-3.75198	34.7136
2	2500	-0.711183	31.252
2	3150	3.5394	25.8962
2	4000	6.79231	21.9878
2	5000	-0.278181	23.6353



Catégorie de pneus	Fréquence	$a_{\text{Roll: VT, RKat, f}}$	$b_{\text{Roll: VT, RKat, f}}$
3	31.5	5.45601	8.42574
3	40	-0.365249	13.1906
3	50	11.9277	8.37232
3	63	12.2599	10.2855
3	80	16.3194	9.38534
3	100	14.6111	11.2397
3	125	16.3862	11.2701
3	160	24.7886	8.05426
3	200	19.7439	14.5955
3	250	23.2539	15.1423
3	315	15.1872	20.4954
3	400	2.32966	28.5116
3	500	0.592192	30.5539
3	630	9.74552	26.0357
3	800	4.54058	31.989
3	1000	2.8868	34.4427
3	1250	-1.20187	34.7634
3	1600	-2.29009	34.4766
3	2000	4.35947	30.4099
3	2500	-0.351806	30.9002
3	3150	5.80858	24.6887
3	4000	2.71897	25.0716
3	5000	0.851248	23.9947



## II Détails des campagnes de mesurages

### II.1 Détails des lieux de collecte des données (relevés statistiques des comportements de conduite)

#### Lieu

Am Wasser, Zurich

#### Type

Tronçon à 30 km/h depuis 2011

Route de liaison intercommunale

TJM env. 9'900

Revêtement routier : AC16

#### Description

Limitation de vitesse à 30 km/h signalée à intervalles réguliers

Radar mobile installé à env. 700 m en direction du pont de l'Europe

Passages pour piétons à une distance d'env. 15 m



#### Lieu

Bullingerstrasse, Zurich

#### Type

Zone à 30 km/h dégagée depuis 2011

Route communale

TJM env. 6'000

Revêtement routier : SMA 11

#### Description

Aménagement zone 30 avec bandes multi-usages

Durant les heures de pointe, engorgement important en amont des installations de signalisation lumineuse du carrefour Bullingerstr./Hardstr. jusqu'à l'emplacement de collecte des données et au-delà



#### Lieu

Schwarzenburgstrasse, Köniz

#### Type

Zone à 30 km/h dégagée depuis 12.12.2005

Route intercommunale

TJM env.ca. 18'000

Revêtement routier : ACMR 8 (étanche)

#### Description

Aménagement zone 30 avec bandes multi-usages

Malgré un très gros volume de trafic, la circulation reste fluide à l'emplacement de la collecte des données.



**Lieu**

Langmauerstrasse, Zürich

À la hauteur du décrochement vertical

**Type**

**Zone à 30 km/h étroite** depuis 2000

Route communale à fonction de desserte

TJM env. 3'000

Revêtement routier : AC 8

**Description**

Aménagement zone à 30 km/h étroite avec décrochement vertical et rétrécissement de la chaussée

L'évaluation a été effectuée directement à la hauteur de la mesure, où le croisement de véhicule est rendu plus difficile



**Lieu**

Langmauerstrasse, Zurich

Entre deux décrochements verticaux

**Type**

**Zone à 30 km/h étroite** depuis 2000

Route communale à fonction de desserte

TJM env. 3'000

Revêtement routier : AC 8

**Description**

La zone d'évaluation correspond à un tronçon libre (sans décrochement vertical et sans rétrécissement de la chaussée), croisement des véhicules possible



**Lieu**

Steinstrasse, Zürich

**Type**

**Situation de référence avec limitation de vitesse à 50 km/h** depuis 1984

Route communale collectrice avec fonction de desserte

TJM env. 10'600

Revêtement routier : SMA 11

**Description**

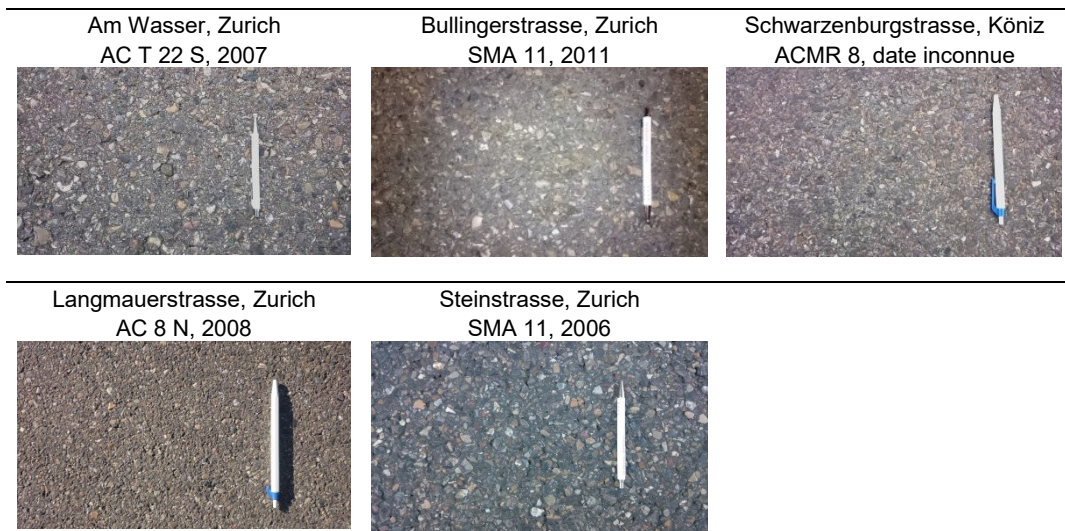
La zone d'évaluation se trouve sur un tronçon libre

Passage pour piétons à env. 15 m



**Particularités :**

Les lieux Am Wasser et Steinstrasse se trouvaient à 15m d'un passage pour piétons.



**Figure 4** : Photos du revêtement sur les lieux de collecte des données (sept./oct. 2015).

## II.2 Plan détaillé du circuit utilisé pour la campagne de mesurages dans le domaine des basses vitesses

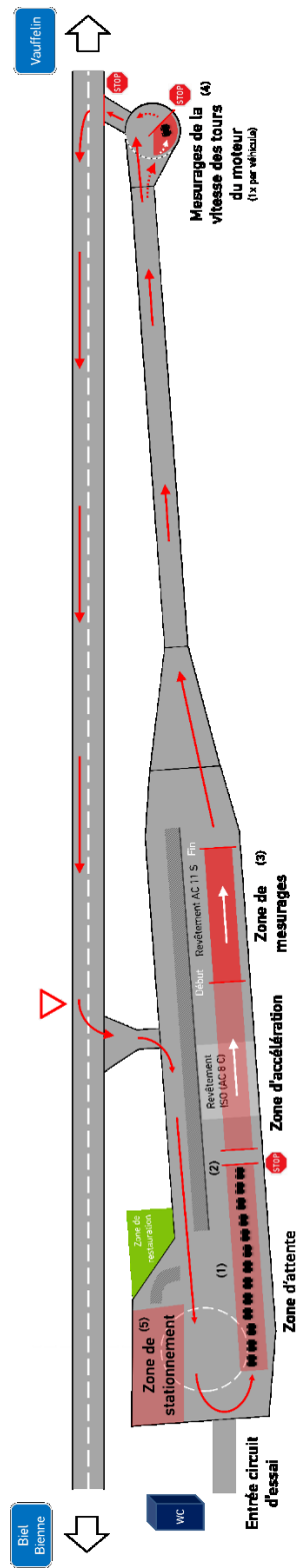


Figure 5: Plan détaillé du circuit du Dynamic Test Center (Vauffelin).

## II.3 Données des véhicules testés lors de la campagne de mesurages dans le domaine des basses vitesses

ID	Marque	Type	Propulsion	Sorte	Places	Cylindrée	Performance	Poids à vide	Poids total	Mise en circulation
1	Ford USA	Mustang 5.0i-V8 GT	Essence	voiture de tourisme	5	4951	312	1775	k.a.	2015
2	Volkswagen	Touran	Essence	voiture de tourisme	7	1390	103	1600	2200	12.03.2009
3	Toyota	Highlander	Hybride	voiture de tourisme	7	3331	155	2140	2785	30.07.2014
4	Audi	A1 1.4 TFSI CoD Sb	Essence	voiture de tourisme	5	1395	103	1215	1635	07.11.2013
5	Toyota	Auris HSD	Hybride	voiture de tourisme	5	1798	73	1420	1865	15.04.2014
6	Volkswagen	Touran 2.0D Blue Motion	Diesel	voiture de tourisme	5	1968	103	1616	2190	06.01.2012
7	Subaru	Impreza	Diesel	voiture de tourisme	5	1998	110	1505	1920	05.04.2011
8	Volkswagen	T5 California TDI	Diesel	voiture de tourisme	4	1968	103	2413	3000	27.02.2012
9	Volkswagen	Golf VII 1.4 TSI 5	Essence	voiture de tourisme	5	1395	90	1259	1750	11.04.2013
10	Volvo	XC60 D3 AWD	Diesel	voiture de tourisme	5	2400	151	1809	2505	15.10.2010
11	Citroen	C4 Picasso 1.6i	Essence	voiture de tourisme	5	1598	110	1641	2040	28.09.2010
12	Volkswagen	Golf VI 1.4 TFSI	Essence	voiture de tourisme	5	1390	118	1354	1860	26.07.2011
13	Renault	Espace 2.0 DCI	Diesel	voiture de tourisme	7	1995	110	1900	2555	18.05.2006
14	BMW	i3	Electrique	voiture de tourisme	4	647	125	1390	1730	25.09.2014
15	Skoda	Octavia C 1.8 TFSI	Essence	voiture de tourisme	5	1798	118	1375	1985	16.12.2011
16	Audi	A3 SB 2.0 TDI	Diesel	voiture de tourisme	5	1968	110	1390	1870	22.02.2013
17	Peugeot	308 SW 1.6 HDI FAP	Hybride	voiture de tourisme	5	1560	82	1491	1975	04.10.2012
18	VW	e-Golf	Electrique	voiture de tourisme	5	k.a.	85	1675	1960	29.07.2014
19	Mini	Cooper	Essence	voiture de tourisme	4	1598	85	1150	1505	14.06.2002
20	Toyota	Previa 2.4	Essence	voiture de tourisme	7	2362	115	1830	2355	15.10.2004
21	Mercedes-Benz	Viano 3.0 CDI	Diesel	voiture de tourisme	7	2987	165	2284	3050	01.07.2013
22	Mercedes-Benz	313 CDI	Diesel	voiture de livraison	3	2143	95	2520	3500	05.11.2012

## II.4 Conditions atmosphériques durant la campagne de mesurages dans le domaine des basses vitesses

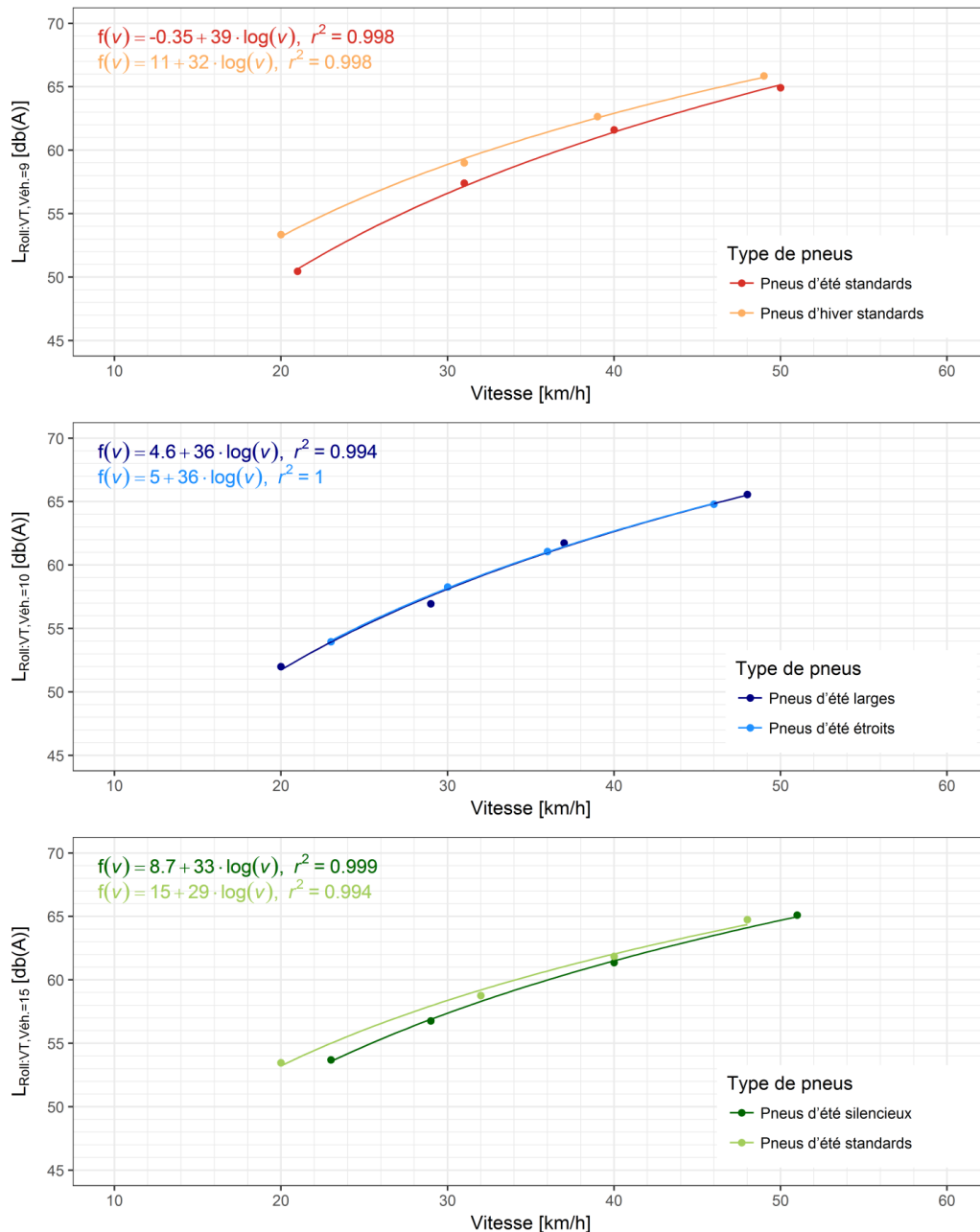
Le 22 avril 2015, au moment des mesurages, la zone des mesurages était exempte de vent et de précipitations. La chaussée était sèche. La température de l'air était comprise entre 13°C et 22°C.

Heure [HNEC]	Température [°C]	
	Air	Revêtement
09h30	13.2	18.3
10h30	15.0	24.0
11h30	18.4	25.0
12h30	20.1	30.0
13h30	20.8	34.2
14h30	21.9	33.3
15h30	21.6	36.6
16h30	21.5	33.4
17h30	20.2	33.3



### III Estimation approximative de l'influence des pneus

Pour estimer l'influence des pneus sur l'émission du bruit de roulement, trois véhicules sélectionnés ont été équipés de différents jeux de pneus durant la campagne de mesurages et leurs émissions acoustiques ont été examinées. Les résultats de ces examens sont représentés graphiquement à la **Figure 6**.



**Figure 6 :** Niveau sonore mesuré au passage ( $L_{\text{Roll:PW}}$ ) en fonction des différents pneus

La **Figure 6** donne une représentation graphique des résultats des mesurages de passage avec des pneus d'été et d'hiver standards de même dimension (en haut), des pneus d'été larges et des pneus d'été étroits (au milieu), ainsi que des pneus d'été standards et des pneus d'été peu bruyants de même dimension (en bas).

La comparaison entre les pneus d'été et d'hiver standards de même dimension montre que dans le domaine des basses vitesses, le bruit du roulement des pneus d'été est nettement inférieur à celui des pneus d'hiver. Pour les pneus d'été larges et étroits, on a mesuré pratiquement aucune différence de niveau sonore lors du test. Ce résultat concorde avec celui de Heutschi et al. (en préparation) [56], qui constate certes, une corrélation entre le niveau d'émission sonore et la largeur des pneus, mais montre une large fourchette d'émissions pour des pneus de largeur égale. Dans le troisième diagramme, à dimension égale, les pneus peu bruyants présentent un bruit de roulement légèrement inférieur aux pneus d'été standards.

On peut supposer que d'autres paramètres comme l'âge, la performance kilométrique, l'étiquette, la dureté de la gomme, etc. ont une influence déterminante sur les émissions de bruit. Comme tous les paramètres concernant le bruit n'ont pas pu être relevés dans le cadre de la campagne de mesurages, la pertinence de l'analyse de l'influence des pneus sur le bruit de roulement est limitée. On sait que le vieillissement des pneus entraîne un durcissement de la gomme et une augmentation des émissions de bruit (cf. [57]).

## Glossaire

Terme	Signification
Style d'accélération	Le style d'accélération est caractérisé par le changement de rapport de vitesse et l'utilisation de l'accélérateur durant le processus d'accélération. On distingue les styles d'accélération prévoyant, sportif et agressif.
Comportement de conduite	Terme général désignant le mode de conduite et le style d'accélération, particulièrement important pour déterminer les émissions acoustiques concernant de basses vitesses.
Mode de conduite	Le mode de conduite décrit le degré de régularité d'un passage. Un mode de conduite constant décrit un comportement de conduite avec une vitesse constante ; un mode de conduite accéléré décrit un comportement de conduite d'un véhicule durant le processus d'accélération (avec arrêt, discontinu).
Flotte des véhicules	Ensemble des véhicules considérés.
Échantillon de la flotte de véhicules	Ensemble des véhicules testés dans le cadre de la collecte de données pour la détermination de la formule d'émission dans le domaine des basses vitesses.
Sélection du rapport de vitesse	Pour caractériser le mode de conduite constant, on fait la différence entre plusieurs rapports de vitesse (par ex. 1 <sup>er</sup> , 2 <sup>e</sup> , 3 <sup>e</sup> rapport de vitesse, etc.)
Distribution de la vitesse	Définit la fonction de distribution de la vitesse de conduite effective relevée lors de l'enquête statistique (voir paragraphe 3.2.1). Dans ce projet, elle est décrite par le biais de la vitesse moyenne $v_{Q50}$ . On admet que dans les situations modélisées présentant un écart de vitesse effective, seul change l'emplacement de la distribution de la vitesse, et non la forme liée au type de zone.
KZM	Mesurages acoustiques de courte durée (mesurage continu pendant au moins 30 min, du côté des émissions ou du côté des immissions).
Nuit	Définit la période de temps comprise entre 22h00 et 6h00.
Heures de pointe	Définit la période de temps comprise entre 6h00 et 8h00 et entre 16h00 et 18h00.
Journée	Définit la période de temps comprise entre 8h00 et 16h00 et entre 18h00 et 22h00.
Situation avec limitation de vitesse à 30 km/h	Terme général désignant les zones et tronçons où la vitesse signalée est de 30 km/h.
Tronçon à 30 km/h	Situation avec limitation de vitesse à 30 km/h sans mesures d'accompagnement et sans aménagements de la zone (uniquement signalisation de la vitesse).
Zone à 30 km/h étroite	Situation avec limitation de vitesse à 30 km/h, où les mesures d'accompagnement (par ex. plots, décrochements verticaux et horizontaux), l'aménagement de la zone et les rétrécissements de la chaussée rendent plus difficile le croisement des véhicules.
Zone à 30 km/h dégagée	Situation avec limitation de vitesse à 30 km/h mise en œuvre par des mesures d'accompagnement et un aménagement de la zone assurant un espace dégagé permettant généralement le croisement des véhicules.
Situation de référence avec limitation de vitesse à 50 km/h	Désigne la situation avec limitation de vitesse à 50 km/h de la Steinstrasse à Zurich et les données qui y ont été récoltées (mode de conduite, style d'accélération, distribution de la vitesse).
Situation initiale	Désigne la situation à l'état initial avec vitesse signalée à 50 km/h, c'est-à-dire avant le réaménagement en une situation avec limitation de vitesse à 30 km/h. Le mode de conduite et le style d'accélération sont décrits avec la situation de référence avec limitation de vitesse à 50 km/h. La forme de la distribution de la vitesse est également empruntée à la situation de référence, mais avec une vitesse moyenne ( $v_{Q50}$ ) de 50 km/h.
Situation cible	Désigne la situation à l'état cible avec vitesse signalée à 30 km/h, c'est-à-dire après le réaménagement en une situation avec limitation de vitesse à 30 km/h. Le mode de conduite, le style d'accélération et la distribution de la vitesse correspondent à l'un des trois types de zones définis. La vitesse moyenne ( $v_{Q50}$ ) peut cependant être modulée.



## Symboles et abréviations

Symbole	Unité / Quantité	Signification
$a_{Antr}$		Coefficient de modèle a du modèle du bruit de propulsion
$a_{Roll}$		Coefficient de modèle a du modèle du bruit de roulement
$b_{Antr}$		Coefficient de modèle b du modèle du bruit de propulsion
$b_{Roll}$		Coefficient de modèle b du modèle du bruit de roulement
$c_{Antr}$		Coefficient de modèle c du modèle du bruit de propulsion
$C_{KorrCNOSSOS}$		Terme de correction constant du modèle du bruit de propulsion pour les camions destiné à corriger la sous-estimation du modèle par CNOSSOS
$f$	Hz	Fréquence centrale de bande de tiers d'octave
$f_{Oct}$	Hz	Fréquence centrale de bande d'octave
<i>Véh.</i>	1 .. 22	Numéro de véhicule de la flotte des véhicules de la campagne de mesurages pour la formule d'émission dans le domaine des basses vitesses à Vauffelin
<i>Rapport de vitesse</i>	1 .. 4	Rapport de vitesse
IQR		Écart interquartile
KB	dB(A)	Valeur caractéristique du revêtement s'écartant du modèle d'émission StL86+
KB <sub>Misch</sub>		Valeur caractéristique du revêtement s'écartant du modèle d'émission StL86+ pour un trafic mixte comprenant 8 % de véhicules lourds
$L_{Antr}$	dB(A)	Niveau du bruit de propulsion pondéré A
$L_{Beschl}$	dB(A)	Niveau du bruit global pondéré A lors de l'accélération
$L_{Gesamt}$	dB(A)	Niveau du bruit global pondéré A (comprend le bruit de roulement et le bruit de propulsion)
Camion		Camion
$L_{Roll}$	dB(A)	Niveau du bruit de roulement pondéré A
<i>Mic</i>	1 .. 10	Position du microphone pendant la campagne de mesurages pour la formule d'émission dans le domaine des basses vitesses à Vauffelin
n		Nombre de points de données considérés dans une certaine relation
VT		Voiture de tourisme
r	m	Distance entre la source sonore et le récepteur
v	km/h	Vitesse
$V_{Q50}$	km/h	Médiane de la distribution de la vitesse (voir la définition dans le glossaire), c'est-à-dire la vitesse à laquelle circulent 50 % des véhicules
$V_{Q85}$	km/h	Centile de 85 % de la répartition de la vitesse, c'est-à-dire la vitesse à laquelle circulent 85 % des véhicules
$V_{ref}$	km/h	Vitesse de référence
<i>Zone</i>	1 .. 3	Type de zone avec limitation de vitesse à 30 km/h



# Bibliographie

## Lois fédérales

- [1] Bundesversammlung der Schweizerischen Eidgenossenschaft, Bundesgesetz über den Umweltschutz, Umweltschutzgesetz (USG). 1983, p. 46.

## Ordonnances

- [2] Der Schweizerische Bundesrat, Lärmschutzverordnung (LSV), 814.41. Schweiz, 1986.

## Arrêtés fédéraux

- [3] Urteil (des Bundesgerichts) 1C\_160/2012 Sumvitg, Einführung einer Tempo 30 auf der Hauptstrasse gegen den Willen des Kantons aufgrund Verkehrssicherheit (kein Trottoir). 2012.
- [4] Urteil (des Bundesgerichts) 1C\_45/2010 Zug, Pflicht, Tempo 30 im Rahmen einer Lärmsanierung zu prüfen. 2010.
- [5] Urteil (des Bundesgerichts) 1C\_17/2010 Münsingen, Tempo 30 ist auf verkehrsorientierten Durchgangsstrassen unter gewissen Umständen zulässig. 2010.
- [6] Urteil (des Bundesgerichts) 1C\_589/2014 Zug, Tempo 30 zur Lärmreduktion ist auch auf kantonalen Durchgangsstrassen zu prüfen. 2016.
- [7] Urteil (des Verwaltungsgerichts) 200\_15\_939\_IV Belp, Anordnung eines Versuchs mit Tempo 30 auf der Kantonsstrasse. 2016, pp. 1–8.

## Circulaires et directives de l'OFROU

- [17] OFROU et OFEV, "Manuel du bruit routier" 2006.
- [24] "Richtlinien für den Lärmschutz an Strassen - RLS-90," in Allgemeine Rundschreiben Straßenbau Nr. 8, Bundesminister für Verkehr, 1990, p. 23.
- [52] Bundesamt für Strassen (ASTRA), "Statistischer Atlas der Schweiz, Thema Mobilität und Verkehr." 2014.

## Normes

- [45] United Nations, "UN Regulation No. 117." 1995.
- [46] ISO/DIS 11819-2, "Acoustics — Method for measuring the influence of road surfaces on traffic noise — Part 2: Close-proximity method," pp. 1–73, 2015.
- [47] ISO/TS 11819-3, "Acoustics — Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise — Part 3: Reference tyres." 2016.
- [50] En iso 11819-1, "Acoustics – Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise – Part 1: Statistical Pass-By method," no. 2313, 2002.

## Documentation

- [8] R. H. Meier (KI Kt. AG), "Fahrversuche zur Bestimmung der maximalen Lärmreduktion von Tempo 30," in Konferenz der Kantonsingenieure (KIK).
- [9] Grolimund + Partner AG, "Potential von Temporeduktionen innerorts als Lärmschutzmassnahme," Stadt Zürich (UGZ) und Kanton Aargau (ATB), 2015.
- [10] K. Heutschi, A.-C. Favre, G. Thomann, J.-M. Wunderli, A. Schrade, and M. Brink, Tempo 30 als Lärmschutzmassnahme Grundlagenpapier zu Recht – Akustik – Wirkung. Bern: Eidgenössische Kommission für Lärmbekämpfung EKLB, 2015.
- [11] EMPA, "Computermodell zur Berechnung von Strassenlärm," in Schriftenreihe Umwelt Nr. 60, Bern: Bundesamt für Umweltschutz, 1987, p. 47.
- [13] R. Bayer, R. Schwarz, and M. Ströhle, "Auswirkungen von Verkehrsberuhigungsmassnahmen auf die Lärmimmissionen" Bundesamt für Strassen, VSS, no. November, 2010.
- [14] A. Köpfler and T. Boss, "T30-Versuch Kalchbühlstrasse, Stadt Zürich, Akustische Begleitmessungen, Messbericht Grolimund + Partner AG," 2009.
- [15] T. Boss, "Versuch Tempo 30 auf der Staufenbergstrasse in Niederlenz, Zwischenbericht Grolimund + Partner AG," 2011.
- [16] "Tempo 30 K 15, Flecken, Rothenburg - Schlussbericht Pilotprojekt," Bau-, Umwelt- und Wirtschaftsdepartement Luzern, 2016.

[18]	M. Brink, K. Wirth, R. Rometsch, and C. Schierz, "Lärmstudie 2000 Zusammenfassung."
[19]	B. Obrist, M. Ringger, and R. Schürmann, "Lärmsanierung an der Quelle durch Tempo 30 Beat Ob- rist," Fachhochschule Nordwestschweiz, 2013.
[20]	J. Quartieri, G. Iannone, C. Guarnaccia, S. D'Ambrosio, A. Troisi, L. T. L, L, and M. N, E. "A Review of Traffic Noise Predictive Models" 5th WSEAS Int. Conf. Appl. Theor. Mech., pp. 72–80, 2009.
[21]	C. Steele, "A critical review of some traffic noise prediction models," Appl. Acoust., vol. 62, no. 3, pp. 271–287, 2001.
[22]	C. Guarnaccia, L. Tony, L, L, N. E. Mastorakis, and J. Quartieri, "A Comparison between Traffic Noise Experimental Data and Predictive Models Results," Int. J. Mech., vol. 5, no. 4, pp. 379–386, 2011.
[23]	S. Kephelopoulos, M. Paviotti, and Anfosso-Ledee, Common Noise Assessment Methods in Europe (CNOSSOS-EU). 2012.
[25]	J. Kragh, "User's Guide Nord2000 Road," 2006.
[26]	H. Steven, "Minderungspotenziale beim Straßenverkehrslärm," in Lärmkongress, 2000.
[27]	W. Probst and B. Huber, "Accuracy and precision in traffic noise prediction," in EuroRegio, 2010.
[28]	U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, "TNM Version 2.5 Addendum to Validation of FHWA's Traffic Noise Model® (TNM): Phase 1," 2004.
[29]	U. Sandberg and J. A. Ejsmont, Tyre/road noise reference book. 2002.
[30]	W. Schwanen, G. Van Blokland, and M. Van Leeuwen, "Comparison of potential CPX-tyres - Variabil- ity within AVON AV4 and SRTT tyre type," M+P - Consult. Eng. Rep. DWW.07.04.2, pp. 1–29, 2007.
[31]	U. Sandberg, "Tyre/ road noise - Myths and realities," Inter-noise 2001, no. 27–30, p. 22, 2001.
[32]	W. Heather, R. Sandy, and A. Richard, "Managing speeds of traffic on European roads: non-accident external and internal effects of vehicle use and how these depend on speed," in 9th Internation Con- ference on Road safety in Europe, 1998, vol. 1.
[33]	G. Van Blokland and B. Peeters, "Modeling the noise emission of road vehicles and results of recent experiments," Internoise 2009, 2009.
[34]	van D. JEF, "Prevalence of acceleration at low speed ( $\leq 50$ km/h) and driving at constand low speed ( $\leq 50$ km/h) and the influence on cummuny annoyance," 2001.
[35]	E. Verheijen, "SWUNG en het Reken- en Meetvoorschrift," 2012.
[36]	W. Kockelke, "Untersuchungen zum Fahrverhalten bei Rechts-vor-Links-Regelung in Tempo 30- Zonen," Forschungsbericht der Bundesanstalt für Strassenwes., no. 236, 1991.
[37]	E. van Blokland, G.J, Kuijpers, A., Gerritsen, "Twee-laags ZOAB, handleiding voor wegbeheerders," CROW publication No. 161, 2001.
[38]	W. Steven and J. Richard, "Laerminderung in Wohnstrassen-auswirkungen von Verkehrsberuhi- gungsmassnahmen auf Fahrverhalten, Geraeuschemission, Abgasemission und Kraftstoffverbrauch," Umweltbundesamt, Texte, no. 13, 1991.
[39]	A. Doeldissen, "Veränderung von Lärm und Abgasen durch die Flächenhafte Einführung von Tempo 30-das Beispiel Buxtehude" Gemeinde-Stadt-Land, no. 11, 1985.
[40]	B. Spessert and B. Kühn, "Vergleichende messtechnische Untersuchungen zum Einfluss einer nächt- lichen Geschwindigkeitsbegrenzung von 50 km/h auf 30 km/h auf die Lärmimmissionen durch den Strassenverkehr," 2010.
[41]	S. Nozon and H. Mazur, "Lärmreduzierung auf innerstädtischen Hauptverkehrsstrassen - Auswertung eines Modellversuches im Rahmen der Rostocker Lärminderungsplanung" Strassenverkehrstech- nik, vol. 47, no. 7, 2003.
[42]	M. Brink and C. Schierz, "Lärmstudie 2000," 2007.
[43]	W. Bartolomaeus and B. Gladbach, "Lärmindernde Straßenoberflächen innerorts eine Bestandsauf- nahme" vol. 4, no. 6, pp. 250–253, 2009.
[44]	L. Goubert, G. Descornet, H. Bendtsen, E. Nielsen, J. Kragh, and J. D. Visscher, "Performance man- agement of low noise pavements, a decision support guide - Technical report," no. November, p. 301, 2007.
[48]	S. Egger, E. Hammer, J. Schaffer, and E. Bühlmann, "Statistische Erhebungen zum Fahrverhalten mit Fokus Tempo 30," Stadt Zürich, 2016.
[49]	H. Ono and Y. Shirahashi, "Vehicle/Road Sound," 2015.
[51]	Bundesamt für Statistik (BFS), "Strassenfahrzeuge im Januar 2016: Neue Inverkehrsetzungen," 2016.
[53]	K. Heutschi, "Schriftenreihe umwelt nr. 366," Schriftenr. Umwelt, no. 366, 2004.
[54]	D. Haefeli, "Schweizer Fahrzeugmarkt 2015," p. 28, 2012.



- 
- [55] K. Heutschi, E. Bühlmann, and J. Oertli, "Options for reducing noise from roads and railway lines," pp. 1–14, 2016.
- 
- [56] E. Bühlmann, S. Schulze, and T. Ziegler, "Ageing of the new CPX reference tyres during a measurement season," in Proc. Inter-noise, 2013, pp. 1–8.
-



# Rapport de fin de projet



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Bundesamt für Strassen ASTRA

## FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Version vom 09.10.2013

### Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 20.09.2016/2.11.2016

#### Grunddaten

Projekt-Nr.: VSS 2012/214

Projekttitel: Grundlagen zur Beurteilung der Lärmwirkung von Tempo 30

Enddatum: 30.09.2016

#### Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

- Wesentliche Lärmreduktionen durch Tempo 30 möglich. Die Forschungsarbeit zeigt, dass Temporeduktionen in vielen Fällen eine zielführende Massnahme zur Reduktion der Lärmemissionen an der Quelle darstellen. Bei Tempo 30 anstelle von 50 km/h lassen sich je nach effektiv gefahrener Geschwindigkeit, Lastwagenanteil und Strassenbelag Reduktionen der Lärmpegel (Leq) von zwischen ca. 2 dB und 4.5 dB erzielen.
- Verbesserte Zuverlässigkeit Abschätzung Lärmwirkung. Mit der im vorliegenden Projekt spezifisch für den niedrigen Geschwindigkeitsbereich entwickelten Quellenformulierung kann die Lärmwirkung von Tempo 30 aufgrund der Berücksichtigung des aktuellen Fahrzeugparks, des Fahrverhaltens und des Zonentyps mit grösserer Zuverlässigkeit abgeschätzt werden als dies mit bisher zur Verfügung stehenden Modellen möglich war.
- Berücksichtigung des aktuellen Fahrzeugparks von zentraler Bedeutung. Aufgrund rezenter Entwicklungen in der Fahrzeugindustrie zu leiseren Motoren und schwereren Fahrzeugen kommt es zu deutlichen Verlagerungen der Hauptlärmquellen hin zu leiseren Antriebsgeräuschen und lauterem Rollgeräuschen. Die Ergebnisse der vorliegenden Studie zeigen, dass sich dieses Phänomen im niedrigen Geschwindigkeitsbereich besonders stark auswirkt. Der Übergangsbereich, bei dem das Rollgeräusch das Antriebsgeräusch überwiegt, hat sich zu tieferen Geschwindigkeiten hin verschoben.
- Berücksichtigung des Fahrverhaltens essentiell. In Tempo 30 Situationen kann das Fahrverhalten deutlich von demjenigen in Tempo 50 Situationen abweichen, was entsprechend wesentliche Auswirkungen auf die Schallemissionen hat.
- In den drei untersuchten Tempo 30 Zonentypen (Zone eng mit vielen Massnahmen, Zone übersichtlich mit wenig Massnahmen und Strecke ohne begleitende Massnahmen) fällt die Lärmwirkung unterschiedlich aus.



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Bundesamt für Strassen ASTRA

#### Zielerreichung:

- Die im Forschungsprojekt angestrebten Zielaussagen konnten vollumfänglich umgesetzt werden:
- + Die getrennte Erhebung von Roll- und Antriebsgeräuschen für eine möglichst breite Auswahl von repräsentativen Fahrzeugtypen, Antriebsarten und Bereifungen mit Fokus auf Personenwagen
  - + Die Ermittlung eines Emissionsansatzes für den niedrigen Geschwindigkeitsbereich bei konstanter Geschwindigkeit und unterschiedlicher Gangwahl / Motorendrehzahl für Personenwagen
  - + Die Ermittlung eines Emissionsansatzes für unterschiedliches Fahrverhalten
  - + Zur Grobabschätzung des Einflusses von Lastwagen auf die Lärmwirkung von Tempo 30 wurde ein Emissionsansatz für Lastwagen aus dem europäischen Emissionsmodell CNOSSOS integriert
  - + Die Erhebung des statistischen Fahrverhaltens an bereits realisierten Tempo 30 Situationen
  - + Das Eruiere der wichtigsten Einflussfaktoren auf die Lärmwirkung von Tempo 30
  - + Das Zusammenführen der statistischen Erhebungen des Fahrverhaltens mit den ermittelten Emissionsansätzen in einer Quellenformulierung
  - + Die Validierung des Quellenansatzes anhand unabhängiger Messdaten

#### Folgerungen und Empfehlungen:

- Effektive Geschwindigkeit**
- Die durch Tempo 30 effektiv erreichte Geschwindigkeitsreduktion (die Differenz zwischen den effektiv gefahrenen Geschwindigkeiten in der Ausgangssituation und der Zielsituation) bildet eine wesentliche Einflussgrösse bezüglich der Lärmwirkung von Tempo 30. Geschwindigkeitsreduktionen von 10 km/h erzielen bereits Wirkung.
  - Langsamer ist nicht immer leiser. Tiefere Geschwindigkeiten unterhalb ca. 25 km/h führen nicht immer zu weiteren Lärmreduktionen, insbesondere wenn die getroffenen Massnahmen zu unetlicher Fahrweise sowie zum Fahren in kleineren Gängen führen.
- LKW-Anteil**
- Die vorliegende Forschungsarbeit zeigt, dass der LKW-Anteil einer Strasse eine wichtige Einflussgrösse darstellt. Die akustische Wirkung von Tempo 30 nimmt mit steigendem LKW Anteil deutlich ab.
  - Bei LKW-Anteilen von mehr als 15% ist nur noch mit einer geringen akustischen Wirksamkeit von Tempo 30 zu rechnen.
  - Unsicherheiten bei höheren LKW-Anteilen und lauten Fahrzeugen (N2). Im vorliegenden Projekt wurden die Emissionen von Lastwagen und lauten Fahrzeugen im niedrigen Geschwindigkeitsbereich nicht spezifisch untersucht und lediglich mittels eines existierenden Modells (CNOSSOS) berücksichtigt. Aufgrund dieser Lücke ist bei der Abschätzung der Lärmwirkung von Tempo 30 auf Strassen mit hohen Anteilen von LKW und lauten Fahrzeugen Vorsicht geboten.
- Akustische Beschaffenheit der Strassenbeläge**
- Laute Beläge machen Tempo 30 effektiver. Die akustische Beschaffenheit des Strassenbelages hat einen wesentlichen Einfluss auf die Lärmwirkung von Tempo 30. Grundsätzlich gilt: Je lauter ein Strassenbelag ist bzw. je stärker er zur Entleerung von Rolgeräuschen beiträgt, desto grösser ist die potentielle Lärmreduktion durch Tempo 30.
  - Lärmarme Beläge mit Tempo 30 als Lärmschutzmassnahme kombinierbar. Erwartungsgemäss fällt die Wirkung lärmarmen Strassenbeläge bei Tempo 30 im Vergleich zu 50 km/h geringer aus. In vielen Fällen beträgt die zusätzliche Wirkung von lärmarmen Strassenbelägen bei Tempo 30 etwa 50% von der Belagswirkung bei 50 km/h, kann aber situationsabhängig zwischen ca. 20 und 70% variieren. In Abhängigkeit des Belagskennwerts des lärmarmen Belags kann bei Tempo 30 mit zusätzlichen Wirkungen von bis zu -2 dB gerechnet werden. Entsprechend kann eine Kombination der Lärmschutzmassnahme Tempo 30 mit dem Einsatz von lärmarmen Belägen situativ als zielführend betrachtet werden. Bei tiefen LKW-Anteilen ist eine höhere Wirksamkeit der Strassenbeläge zu erwarten.

#### Publikationen:

Neben der Publikation des Forschungsberichts in der Mobilityplattform werden Beiträge für internationale Konferenzen sowie ein Artikel in den Zeitschriften "Strasse und Verkehr" und SVI-Zeitschrift Strassenverkehrstechnik angestrebt.

#### Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Ziegler Vorname: Toni

Amt, Firma, Institut: VR-Präsident, Grolimund + Partner AG

#### Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:

sign. Toni Ziegler

## FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

### Formular Nr. 3: Projektabschluss

#### Beurteilung der Begleitkommission:

##### Beurteilung:

Das zentrale Ziel der Forschungsarbeit, nämlich aktuelle Grundlagen zur Beurteilung der Lärmwirkung von Tempo 30 auszuarbeiten, gilt als erreicht. Allerdings gibt es auch Unsicherheiten so z.B. beim Einfluss von Lastwagen, Motorrädern, Bussen und Traktoren (N2-Anteil). Dazu konnte eine umfassende Validierung der Quellenformulierung aus Kosten Gründen nicht vorgenommen werden. Die ausgewiesenen Lärmwirkungen gelten auf ebener Strecke und bei geringen LKW-Anteilen und Steigungen bis 6%. Bei den Strassenbelägen gelten die ausgewiesenen Lärmwirkungen für Tempo 30 für einen akustisch neutralen Strassenbelag (z.B. neuerer AC 11). Bei Strassenbelägen mit abweichenden akustischen Eigenschaften kann die Lärmwirkung massgeblich anders ausfallen.

##### Umsetzung:

Das im Forschungsbericht entwickelte Modell hat einen Stand erreicht, so dass dieses durch die EMPA nach programmiert werden und in Lärmberechnungsmodellen für den niedrigen Geschwindigkeitsbereich implementiert werden kann.

##### weitergehender Forschungsbedarf:

Das BAFU sichert für weitergehende Validierungsmessungen für schwere Fahrzeuge und Motorräder finanzielle Mittel zu. Dadurch soll die Prognosequalität weiter geprüft und die Akzeptanz des Modells gesteigert werden. Der Auftrag soll wiederum unter dem Patronat des VSS mit denselben Begleitkommissionsmitgliedern und Grolimund & Partner AG bearbeitet werden. Die Umsetzung von Tempo 30 und die Auswirkungen von Massnahmen auf die effektive Geschwindigkeit waren nicht Teil der vorliegenden Arbeit. Dazu sind ergänzende Forschungsarbeiten nötig.

##### Einfluss auf Normenwerk:

Keinen.

#### Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Stern Vorname: Thomas

Amt, Firma, Institut: Tiefbauamt des Kantons Bern

#### Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

sign. Thomas Stern



## Liste des rapports de recherche dans le domaine de la circulation routière

Le répertoire des rapports finaux publiés récemment peut être téléchargé sur notre site [www.astra.admin.ch](http://www.astra.admin.ch) (Recherche en matière de routes --> Downloads --> Formulaires).

