



**CAHIER DE  
L'ENVIRONNEMENT  
N° 366**

**Bruit**

**SonRoad**

**Modèle de calcul  
du trafic routier**



Office fédéral de  
l'environnement,  
des forêts et  
du paysage  
OFEFP



**CAHIER DE  
L'ENVIRONNEMENT  
N° 366**

**Bruit**

**SonRoad**

**Modèle de calcul  
du trafic routier**

**Publié par l'Office fédéral  
de l'environnement, des forêts  
et du paysage OFEFP  
Berne, 2004**

**Editeur**

Office fédéral de l'environnement, des forêts et  
du paysage (OFEFP)

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

**Mandataire**

Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et de  
recherche (EMPA), Division Acoustique, Dübendorf

**Auteur**

Dr. Kurt Heutschi

**Accompagnement OFEFP**

Jean-Daniel Liengme, div. Lutte contre le bruit

**Traduction**

Denis Geinoz, Romont

**Référence**

Heutschi K, 2004: SonRoad – Modèle de calcul du trafic  
routier. Cahier de l'environnement n° 366. Office fédéral  
de l'environnement, des forêts et du paysage, Berne. 74 p.

**Couverture**

© OFEFP/Docuphot

**Téléchargement du fichier PDF**

<http://www.buwalshop.ch>

(Il n'existe pas de version imprimée)

Référence: SRU-366-F

# Table des matières

<b>Symboles utilisés</b>	<b>5</b>
<b>Abstracts</b>	<b>7</b>
<b>Avant-propos</b>	<b>9</b>
<b>Résumé</b>	<b>11</b>
<b>1 Mandat et groupe de projet</b>	<b>13</b>
<b>2 État de la technique</b>	<b>14</b>
2.1 Modèle français XP S 31-133 . . . . .	14
2.1.1 Modélisation des sources . . . . .	14
2.1.2 Modélisation de la propagation . . . . .	14
2.2 Modèle américain TNM . . . . .	16
2.2.1 Préambule . . . . .	16
2.2.2 Modélisation des sources . . . . .	16
2.2.3 Modèle de propagation . . . . .	17
2.3 Modèle scandinave Nord2000 . . . . .	19
2.3.1 Préambule . . . . .	19
2.3.2 Modèle de propagation . . . . .	19
2.4 Évaluation des algorithmes et conséquences pour SonRoad . . . . .	20
2.5 Évaluation des algorithmes et conséquences pour SonRoad . . . . .	21
<b>3 Le modèle de calcul SonRoad</b>	<b>23</b>
3.1 Hypothèses à la base du modèle SonRoad . . . . .	23
3.2 Déroulement typique d'un calcul d'exposition au bruit routier . . . . .	23
3.3 Modèle de source . . . . .	23
3.3.1 Intensité de la source . . . . .	23
3.3.2 Formulation en termes de puissance de la source . . . . .	28
3.3.3 Calcul du niveau équivalent Leq à partir du niveau maximum de passage . . . . .	29
3.3.4 Hauteur de la source . . . . .	30
3.3.5 Vitesse effective de circulation . . . . .	30
3.3.6 Discrétisation de la route . . . . .	30
3.4 Modèle de propagation . . . . .	31
3.4.1 Préambule . . . . .	31
3.4.2 Aperçu . . . . .	31
3.4.3 Décroissance géométrique . . . . .	31
3.4.4 Atténuation dans l'air . . . . .	32
3.4.5 Effet de sol, effet d'obstacle et réflexions . . . . .	33
3.5 Effets d'atténuation supplémentaires . . . . .	40
3.6 Calcul du niveau d'immission pondéré A . . . . .	40
3.7 Détermination du niveau d'évaluation . . . . .	41
3.8 Conseils d'utilisation . . . . .	41
<b>4 Comparaison de SonRoad avec StL-86</b>	<b>45</b>

<b>5 Perspectives - compléments et extensions futures du modèle</b>	<b>47</b>
<b>Annexes</b>	
<b>A Déclaration de conformité pour la mise en application de SonRoad</b>	<b>48</b>
<b>B Situations de référence calculées avec SonRoad</b>	<b>50</b>
B.1 Propagation de point à point . . . . .	50
B.2 Longue route rectiligne . . . . .	64
<b>C Proposition de stratégie visant à identifier les chemins sonores significatifs</b>	<b>65</b>
C.1 Généralités . . . . .	65
C.2 Recherche du chemin direct . . . . .	66
C.3 Construction des chemins réfléchis potentiels . . . . .	66
C.4 Première élimination des chemins réfléchis non valides . . . . .	67
C.5 Redressement éventuel de chemins réfléchis . . . . .	67
C.6 Seconde élimination des chemins réfléchis non valides . . . . .	67
<b>D Représentation complexe de grandeurs sinusoïdales</b>	<b>69</b>
<b>E Évaluation numérique de <math>wofz(z)</math> (fonction d'erreur)</b>	<b>70</b>
<b>F Estimation du paramètre de perte de cohérence</b>	<b>72</b>
<b>G Atténuation du filtre A dans les bandes de tiers d'octave</b>	<b>73</b>
<b>H Concept des zones de Fresnel</b>	<b>74</b>

## Symboles utilisés

$\alpha_f$	coefficient d'absorption de l'air dans la bande de tiers d'octave de fréquence centrale $f$ [dB/km]
$A_f$	atténuation due à la propagation dans la bande de tiers d'octave de fréquence centrale $f$ [dB]
$A_{div,f}$	décroissance géométrique dans la bande de tiers d'octave de fréquence centrale $f$ [dB]
$A_{atm,f}$	atténuation dans l'air dans la bande de tiers d'octave de fréquence centrale $f$ [dB]
$A_{gr/bar/refl,f}$	effet de sol et effet d'obstacle y compris réflexions dans la bande de tiers d'octave de fréquence centrale $f$ [dB]
$A_{fol,f}$	atténuation supplémentaire résultant d'une végétation dense dans la bande de tiers d'octave de fréquence centrale $f$ [dB]
$A_j(i,k)$	atténuation due à la propagation dans la bande de tiers d'octave n° $j$ de la source ponctuelle n° $k$ appartenant au tronçon $i$ vers le point récepteur [dB]
$c$	vitesse du son = 340 m/s
$d$	distance [m]
$d_0$	distance de référence = 1 m
$d_{ss}$	distance source - première arête de l'obstacle [m]
$d_{sr}$	distance deuxième arête de l'obstacle - réception [m]
$D_z(f)$	effet de l'obstacle en fonction de la fréquence $f$ [dB]
$\Delta_{BG}$	correction due au revêtement sur le bruit global [dB(A)]
$\Delta_{BR}$	correction du revêtement sur le bruit de roulement [dB(A)]
$\Delta_S$	correction due à la déclivité [dB(A)]
$e$	distance entre les arêtes des deux obstacles en cas de double diffraction
$f$	fréquence [Hz]
$g$	pente de la route [%]
$\gamma, \gamma_0$	paramètres empiriques permettant de tenir compte de la perte de cohérence
$h_s$	hauteur de la source au-dessus du sol [m]
$h_r$	hauteur du point de réception au-dessus du sol [m]
$k$	nombre d'onde = $\frac{2\pi}{\lambda}$ [1/m]
$K1$	correction de niveau permettant de tenir compte de la densité de trafic
$K_{met}$	facteur de correction permettant de tenir compte de la réduction de l'effet de l'obstacle
$\lambda$	longueur d'onde [m]
$l_F$	longueur de la zone de Fresnel $\lambda/4$ [m]
$l_s$	longueur du segment situé à l'intérieur de la zone de Fresnel $\lambda/4$ [m]
$L_{Max,7.5m,A}$	niveau max de pression acoustique pondéré A à une distance de 7.5 m [dB(A)]
$L_{W,A}$	niveau de puissance acoustique pondéré A [dB(A)]
$L_{7.5m,A,Freiefeld}$	niveau de pression acoustique pondéré A à une distance de 7.5 m en champ libre [dB(A)]
$L_{eq,frei,A}$	niveau d'immission pondéré A en un point libre dans l'espace [dB(A)]
$L_{eq,m}$	niveau d'immission pondéré A à la fenêtre ouverte [dB(A)]
$L_r$	niveau d'évaluation [dB]
$L_{W,f}$	niveau de puissance acoustique dans la bande de tiers d'octave de fréquence centrale $f$ [dB]
$L_{W,A,PW}(i)$	niveau de puissance acoustique pondéré A d'une voiture de tourisme se déplaçant sur le tronçon n° $i$ , selon éq. 3.3 [dB(A)]
$L_{W,A,LKW}(i)$	niveau de puissance acoustique pondéré A d'un poids-lourd se déplaçant sur le tronçon n° $i$ , selon éq. 3.4 [dB(A)]
$M_{PW}(i)$	nombre de voitures de tourisme par heure sur le tronçon n° $i$
$M_{LKW}(i)$	nombre de poids lourds par heure sur le tronçon n° $i$
$N$	trafic motorisé horaire de jour ou de nuit
$\underline{p}$	valeur efficace de la pression acoustique en représentation complexe [Pa]
$p_{A,Q}$	valeur efficace de la pression acoustique pondérée A produite à 1m d'un véhicule en marche [Pa]
$p_0$	valeur efficace de la pression acoustique de référence = 2E-5 Pa
$\underline{p}_{dir,ref}(f)$	pression acoustique de référence au point récepteur lorsque seule la décroissance géométrique

	est prise en compte [Pa]
$p_{\text{dir}}(f)$	pression acoustique du son direct au point récepteur lorsque la décroissance géométrique et l'effet éventuel d'obstacles sont pris en compte [Pa]
$p_{\text{gr}}(f)$	pression acoustique au point récepteur résultant d'une réflexion au sol [Pa]
$p_{\text{refl}}(f)$	pression acoustique au point récepteur résultant d'une réflexion ne provenant pas du sol [Pa]
$\Phi(f)$	facteur de zone de Fresnel
$Q(f)$	coefficient de réflexion d'onde sphérique
$r$	distance [m]
$R_1$	distance source - récepteur [m]
$R_2$	distance source - point de réflexion - récepteur [m]
$r_p(f)$	coefficient de réflexion d'onde plane
$\Delta R(i)$	perte par réflexion sur le segment n° $i$ [dB]
$\sigma$	résistance à l'écoulement [Rayl]
$\Delta s(i,k)$	secteur longitudinal représenté par la source ponctuelle n° $k$ sur le secteur de source linéaire n° $i$ [m]
$t$	temps [s]
$T_j$	différence de niveau entre le bruit du trafic routier pondéré A et le niveau du tiers d'octave n° $j$ pondéré A, selon tableau 3.5 [dB]
$v'$	vitesse du véhicule [m/s]
$v$	vitesse du véhicule [km/h]
$v_{\text{PW}}(i)$	vitesse des voitures de tourisme sur le tronçon de source linéaire n° $i$ [km/h]
$v_{\text{LKW}}(i)$	vitesse des poids-lourds sur le tronçon de source linéaire n° $i$ [km/h]
$z$	différence de chemin [m]
$Z(f)$	impédance d'une surface de séparation normalisée à $\rho c$ avec $\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$



## Abstracts

The new SonRoad model permits calculation of the exposure to road traffic noise at small and medium distances from the source, while ignoring the influence of the weather. The source specification is significantly more detailed than that of the StL86+ model used till now in Switzerland. In the new model, the motor and wheel noise components are calculated separately for cars and lorries as a function of speed, longitudinal road inclination, surface characteristics and traffic density. The SonRoad propagation model is based on the ISO 9613-2 standard, but adopts an entirely different approach to the calculation of the ground effect in the application of wave theory.

For direct propagation (i.e. without interference from obstacles), comparison between the old and the new models shows a general reduction in the values for soft ground (e.g. grass) and an increase in those for hard ground (e.g. asphalt) using SonRoad. In the presence of intervening obstacles, the values calculated by SonRoad are higher than for StL86+. The differences between the two models also depend on the particular circumstances and can amount to several dB.

*Keywords: road noise, road noise model, source model, noise propagation model*

Das neue Berechnungsmodell SonRoad bildet die Grundlage zur Berechnung von Strassenverkehrslärmimmissionen für kleine bis mittlere Abstände ohne Berücksichtigung von Wettereinflüssen. Die Quellenbeschreibung wurde gegenüber dem bisher in der Schweiz verwendeten Modell StL86+ wesentlich verfeinert: Die Antriebs- und Rollgeräuschkomponenten werden getrennt für Personen- und Lastwagen in Abhängigkeit der Geschwindigkeit, der Strassenlängsneigung, des Belagstyps und der Verkehrsstärke beschrieben. Das Ausbreitungsmodell orientiert sich weitgehend an der Norm ISO 9613-2, beschreitet aber bei der Behandlung des Bodeneffekts unter Einbezug von wellentheoretischen Lösungen einen völlig anderen Weg.

Der Vergleich des neuen Modells SonRoad mit dem Modell StL86+ zeigt tendenziell bei einer Schallausbreitung ohne Hindernis eine Verringerung der Werte bei weichem Boden (Rasen) und eine Erhöhung bei hartem Boden (Asphalt). Bei einer Unterbrechung der Sichtlinie durch Hindernisse liegen die mit SonRoad berechneten Pegel höher als jene von StL86+. Situationsabhängig zeigen sich zwischen dem alten und dem neuen Modell Unterschiede von mehreren dB.

*Stichwörter: Strassenlärm, Strassenlärberechnungsmodell, Quellenmodell, Schallausbreitungsmodell*

Le nouveau modèle SonRoad permet de calculer les immissions de bruit du trafic routier sur de petites et de moyennes distances, sans tenir compte des influences météorologiques. La description de la source est nettement plus détaillée qu'avec le modèle StL86+, utilisé jusqu'à présent en Suisse: le bruit de la propulsion et le bruit de roulement sont décrits séparément pour les voitures de tourisme et les poids lourds, en fonction de la vitesse, de la pente de la route, du type de revêtement et du débit. Le modèle de propagation se réfère à la norme ISO 9613-2, même s'il traite l'effet de sol sous un tout autre angle, celui de la théorie ondulatoire.

En comparant les deux méthodes, il apparaît que, dans le cas de figure d'une propagation sans obstacle, le modèle SonRoad conduit généralement à des valeurs plus faibles que le modèle StL86+ avec un sol mou (pelouse), alors que les niveaux sont plus élevés en présence d'un sol dur (asphalte). Si des obstacles interrompent la ligne de visée, les niveaux calculés avec SonRoad sont plus élevés que ceux qui découlent de StL86+. Dans certaines situations, les différences entre les deux modèles sont de l'ordre de plusieurs dB.

*Mots-clés: bruit du trafic routier, modèle de calcul du bruit du trafic routier, modèle de source, modèle de propagation*

Il nuovo modello di calcolo SonRoad offre una base per rilevare da breve e media distanza le immissioni foniche causate dal traffico stradale, escludendo l'influenza esercitata dalle condizioni meteorologiche. Rispetto al modello StL86+ utilizzato sinora in Svizzera, la descrizione delle fonti è stata notevolmente migliorata: le componenti propulsione e rumore di rotolamento delle automobili e degli autocarri sono state suddivise e descritte nelle categorie velocità, pendenza delle strade, tipo di manto stradale e intensità del traffico. Il modello di propagazione poggia prevalentemente sulla norma ISO 9613-2, ma per trattare l'effetto suolo percorre un'altra strada ricorrendo a soluzioni basate su teorie delle onde.

Se le onde sonore si propagano senza incontrare ostacoli, il confronto fra il nuovo modello SonRoad e il modello StL86+ mostra tendenzialmente che i valori del rumore si riducono quando la superficie del suolo è morbida (prato) e aumentano quando tale superficie è dura (asfalto). Se ci sono ostacoli che interrompono la linea di visuale, i livelli di rumore calcolati con SonRoad sono invece superiori a quelli stabiliti con il modello StL86+. A seconda della situazione, tra i due modelli emergono differenze di diversi dB.

*Parole chiave: rumore stradale, modello di rumore stradale, modello di fonte, modello di propagazione sonora*

# Avant-propos

Calculer l'exposition au bruit dans des situations réelles est utile pour de nombreuses tâches, notamment l'exécution de la législation sur la protection contre le bruit. On utilise pour ce faire un modèle de calcul qui peut désormais être intégré aux logiciels correspondants.

Conformément à son mandat légal, l'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP) a publié jusqu'à présent deux modèles permettant de calculer les immissions de bruit du trafic routier. Il s'agit du modèle StL86 (Cahier de l'environnement n° 60, 1987) et du modèle de calcul du bruit du trafic routier dans les zones habitées (Cahier de l'environnement n° 15, 1991, 3e édition)<sup>1</sup>. Le modèle StL86 a été adapté en 1995 aux connaissances de l'époque (Informations concernant l'OPB n° 6) et est actuellement utilisé partout en Suisse comme algorithme de calcul dans le domaine du bruit du trafic routier sous le nom de StL86+.

La méthode de calcul du modèle StL86+ date du début des années 80 et n'est plus actuelle sous plusieurs aspects. Elle peut être optimisée grâce à l'amélioration constante des connaissances relatives aux processus physiques et grâce à la puissance de calcul disponible aujourd'hui. Le nouveau modèle de calcul SonRoad met à jour le calcul du bruit du trafic routier en Suisse. Le nouvel algorithme de calcul correspond en outre à l'évolution actuelle des modèles utilisés dans d'autres pays.

SonRoad doit permettre d'améliorer le calcul des immissions de bruit du trafic routier et contribuer à la lutte contre le bruit en Suisse.

Office fédéral de l'environnement, des forêts et  
du paysage

*Urs Jörg*  
*Chef de la division Lutte contre le bruit*

---

1. Les deux documents sont épuisés.



## Résumé

Jusqu'à présent, en Suisse, les calculs du bruit routier se faisaient à l'aide du modèle StL-86 ou d'algorithmes comparables tels que RLS-90. L'origine de ces modèles remonte au début des années 1980; ils ne sont donc plus d'actualité à plusieurs points de vue. En effet, depuis lors, des changements sont intervenus au niveau de l'émission sonore des véhicules et, d'autre part, on dispose de méthodes nettement plus fines pour calculer la propagation du son. Afin de réajuster le calcul du bruit de la route en Suisse à l'état actuel des connaissances, l'OFEFP a chargé l'EMPA et sa division d'acoustique d'actualiser la directive réglant les calculs du bruit de la route - désignée ci-après par l'appellation SonRoad.

On a développé un nouveau modèle de source décrivant les émissions, lequel prend en compte, pour un trafic fluide subdivisé en voitures de tourisme et poids lourds, le bruit de la propulsion et le bruit de roulement en fonction de la vitesse. Grâce à cette description de la source nettement plus fine que dans l'ancien modèle, il est possible de modéliser plus précisément et plus commodément des paramètres externes, tels que revêtement routier spécial ou déclivités. Ce modèle de source repose sur la vitesse effective. Si l'on ne connaît pas cette vitesse, il faut faire appel à une valeur empirique applicable à des situations routières caractéristiques.

Pour calculer la propagation du son de la source aux points d'immission, on dispose d'une méthode de calcul complète, la norme internationale ISO 9613-2. Le nouveau modèle SonRoad repose pour l'essentiel sur cet outil, tout en empruntant une autre voie pour traiter l'effet de sol. Compte tenu des puissances de calcul dont on dispose aujourd'hui, il est possible d'utiliser des solutions d'approximation numériques pour le traitement par la théorie ondulatoire du cas d'une source ponctuelle sur un terrain plat homogène. Les développements actuels de modèles de propagation utilisés à l'étranger s'appuient presque exclusivement sur cette méthode. Le modèle SonRoad utilise également cette solution. Des extensions semi-empiriques faisant appel au concept des zones de Fresnel permettent de généraliser cette solution à un terrain aléatoire.

En comparant les deux méthodes, il apparaît que, pour le cas de figure d'une propagation sans obstacle, avec un sol mou (herbe), la nouvelle directive SonRoad conduit généralement à des valeurs plus faibles que le modèle StL-86. En présence d'un sol dur, par exemple de l'asphalte, les niveaux sont plus élevés dans le modèle SonRoad que dans le modèle StL-86. Si des obstacles interrompent la ligne de visée, les niveaux calculés avec SonRoad sont plus élevés que ceux qui découlent de StL-86.

Le présent rapport expose le modèle complet de calcul du bruit de la route SonRoad. Les algorithmes ont été programmés deux fois indépendamment au stade de prototypes et testés. Dans la perspective d'implémentations ultérieures, une série de tests ont été effectués à des fins de contrôle.



# 1 Mandat et groupe de projet

Par mandat du 30 novembre 2001, l'OFEFP, Division de la lutte contre le bruit, a chargé l'EMPA, Division de l'acoustique, de la mise à jour du modèle de calcul StL-86 pour bruit du trafic routier, actuellement en usage en Suisse. Le modèle StL-86 date des années 1980 et ne correspond plus à l'état des connaissances actuelles. L'objectif visé consiste à formuler un modèle de calcul moderne, faisant appel à des algorithmes actualisés. Les nouveautés concernent aussi bien la formulation des sources, que la modélisation de la propagation sonore. Assurément, le nouveau modèle SonRoad doit permettre une représentation fiable de la charge sonore résultant du trafic routier.

Côté OFEFP, la conduite du projet incombait à Jean-Daniel Liengme, tandis que le chef de projet à l'EMPA était Kurt Heutschi. Dans le cadre d'un projet particulier, le bureau Grolimund+Partner SA à Aarau, représenté par Toni Ziegler, a traité des questions relatives à l'influence du revêtement routier sur le bruit émis et à la prise en compte de la vitesse effective des véhicules. Jan Hofmann, de l'EMPA, a pris une part prépondérante à la mise en oeuvre et à l'implémentation du concept SonRoad.

## 2 État de la technique

A fin 2001, on disposait à l'échelon mondial d'une multitude de méthodes pour le calcul du bruit du trafic routier<sup>1</sup>. Dans ce contexte, il y a lieu de faire la distinction entre les modèles de référence, qui s'appuient sur la résolution numérique de l'équation d'onde, et les modèles d'ingénierie, qui sont basées sur des formules plus ou moins empiriques.

Les outils classiques auxquels font appel les méthodes de référence sont les méthodes par éléments finis et par éléments marginaux. Dans le cas de la méthode par éléments finis, l'intégralité de la topographie, avec la méthode par éléments marginaux, la surface enveloppe de la situation devra être découpée en petits éléments. Petit est à considérer à l'aune de la longueur d'onde, pratiquement, on considère des éléments ayant des dimensions de 1/6...1/10 de longueur d'onde. En admettant une limite supérieure de fréquence de 4 kHz, correspondant à une longueur d'onde de 10 cm, on arrive à un découpage de situation typique comprenant un nombre astronomique d'éléments de l'ordre de 1...2 cm, qui, à vues humaines, dépassent largement les capacités de calcul disponibles. En opérant certaines simplifications, telles que l'hypothèse d'on-des progressives pures sur un sol plan, on peut faire appel à l'équation parabolique. Ceci diminue considérablement la quantité de calculs car une solution par étapes devient possible et on peut alors travailler avec des systèmes d'équations nettement plus petits. À côté de l'équation parabolique, la représentation de la propagation du son le long de rayons courbes offre une possibilité intéressante de calcul de propagation (ray tracing<sup>2</sup>). Le concept du ray tracing relève de l'acoustique géométrique, cela signifie que les phénomènes ondulatoires, telles que la diffraction, doivent être pris en compte par une approche séparée.

Les modèles de référence ne sont appliqués pratiquement que dans des instituts de recherche, tandis que les modèles d'ingénierie servent à effectuer des calculs d'exposition au bruit à grande échelle. Dans l'UE se dessine, avec le projet Harmonoise, une tendance claire vers l'harmonisation des calculs de bruit routier. On peut admettre qu'un modèle européen de calcul du bruit routier verra le jour d'ici 7 à 10 ans. La principale difficulté à surmonter n'est pas tellement l'acceptation, la physique est partout la même, que le fait que les évaluations fondées sur les résultats des calculs physiques divergent sensiblement d'un pays à l'autre. Pour une période transitoire, il est recommandé aux pays ne disposant pas de leur propre modèle de calcul du bruit du trafic routier d'utiliser le modèle français XP S 31-133 (voir ci-dessous). En plus du modèle français, deux approches récentes revêtent un intérêt particulier. Ce sont le modèle américain TNM et le modèle scandinave Nord 2000. Le nouveau modèle suisse pour le calcul du bruit du trafic devrait s'appuyer et se mesurer sur ces trois modèles.

### 2.1 Modèle français XP S 31-133

Le modèle français XP S 31-133 traite aussi bien la problématique du bruit du trafic routier que celle du bruit du trafic ferroviaire. Il a fait l'objet d'une norme nationale et a été publié en 2001<sup>3</sup>.

#### 2.1.1 Modélisation des sources

Aucune indication concrète n'est formulée concernant les niveaux d'émission. Pour le bruit routier, on admet une source située à une hauteur de 0.50 m.

#### 2.1.2 Modélisation de la propagation

Dans un premier temps, la route est découpée en des segments suffisamment petits, lesquels sont représentés par une source ponctuelle. Dans un second temps, l'atténuation sur le chemin de propagation entre chaque source et chaque point récepteur est calculée par bande d'octave. Ce calcul prend en compte:

- la décroissance géométrique

---

1. Campbell Steele, A critical review of some traffic noise prediction models, Applied Acoustics, vol. 62, p.271-287 (2001)

2. D. Heimann, G. Gross, Coupled simulation of meteorological parameters and sound level in a narrow valley, Applied Acoustics, vol. 56, p.73-100 (1999).

3. Acoustique: Bruit des infrastructures de transports terrestres, AFNOR, normalisation française, XP S 31-133, 2001.



- l'absorption de l'air
- l'effet de sol
- l'effet d'écran
- l'augmentation du niveau sonore par des réflexions simples sur des parois verticales

### **Distribution des sources sur l'axe routier**

Il est recommandé de traiter chaque voie de circulation séparément. Pour la constitution de segments, c'est à dire le découpage de chaque voie de circulation en sources ponctuelles, trois possibilités sont offertes:

- segmentation correspondant à des pas angulaires constants
- segmentation correspondant à des distances constantes sur la route
- segmentation resp. variable ou adaptative.

La puissance acoustique affectée à une source est proportionnelle à la longueur du segment qu'elle représente.

### **Absorption de l'air**

L'absorption de l'air se calcule conformément à ISO 9613-1. Les constantes d'atténuation par bandes d'octave pour une température de 15°C et une humidité relative de 70% sont indiquées dans un tableau. Les constantes d'atténuation ont été déterminées pour la fréquence centrale de chacune des bandes d'octave. Dans la plage des hautes fréquences, un découpage en bandes d'octave apparaît comme trop grossier, conduisant ainsi à des erreurs systématiques.

### **Effet de sol**

L'effet de sol se calcule conformément à la méthode décrite dans ISO 9613-2. Étant donné que ce procédé ne s'applique qu'au calcul de l'effet de sol en terrain plat, il faut déterminer une valeur moyenne du tracé du terrain entre la source et le point récepteur. Cette opération est réalisée par une régression linéaire, selon la méthode des moindres carrés. Il arrive alors que les sources ou le point récepteur se situent en dessous du sol moyen. En pareil cas, la hauteur du point correspondant est fixée à 0. La méthode fait la distinction entre un sol absorbant (herbe, etc.) et un sol réfléchissant (asphalte, etc.). Le modèle français distingue deux cas de propagation : propagation progressive (sous le vent, inversion de température) la propagation homogène (neutre). Dans le cas de la propagation progressive, le calcul de l'effet de sol se fait exactement selon Iso 9613-2. Avec une propagation homogène, on utilise une nouvelle formule.

### **Obstacles**

Lorsque la ligne de visée entre la source et le point récepteur est interrompue par des obstacles, on procède de la manière suivante : on place un point auxiliaire sur l'arête de l'obstacle. On détermine un terrain moyen côté source et côté récepteur. Sur chacun des terrains ainsi obtenu, on construit le symétrique du point source et du point récepteur. On détermine alors l'effet d'obstacle pour les tracés source-point auxiliaire-récepteur, symétrique de la source-point-auxiliaire-récepteur et source-point auxiliaire-symétrique du récepteur, en appliquant la formule d'effet d'obstacle figurant dans ISO 9613-2 (avec  $C'2 = 40$ ). En utilisant la formule d'effet de sol citée précédemment, on superpose les trois tracés et l'on détermine un effet d'obstacle global. L'effet d'obstacle est limité à 25 dB. Pour le cas d'une propagation préférentielle, on prendra en compte une propagation du son direct incurvée vers le bas. Une formule de la norme permet de déterminer de combien se déplace vers le haut le point d'intersection de la ligne directe source-récepteur avec l'obstacle. Il en résulte une diminution de la différence de chemin déterminante pour le calcul de l'effet d'obstacle.

### **Réflexions sur des parois**

On considère des réflexions spéculaires sur des parois verticales. Une réflexion ne peut se produire que lorsque les dimensions du réflecteur dépassent nettement la longueur d'onde du son, cette condition n'étant toutefois pas formulée précisément.

## Influence des conditions météo

L'influence des conditions météo se fait essentiellement de manière empirique lors du calcul de l'effet de sol et de l'effet d'obstacle (comme décrit ci-dessus). Seules les situations dans lesquelles la propagation est entravée (vent contraire, inversion de température instable) sont traitées de manière explicite.

## 2.2 Modèle américain TNM

### 2.2.1 Préambule

A la fin des années 90, on a introduit aux États-Unis le nouveau modèle de calcul du trafic routier TNM (Trafic Noise Model). Celui-ci a pris la relève du modèle STAMINA, utilisé jusqu'alors. Les algorithmes de TNM ont été développés par le bureau d'acousticiens Harris Miller & Hanson Inc sous l'égide du Volpe-Center (U.S. Department of Transportation, Research and Special Programs Administration, Volpe National Transportation Systems Center, Cambridge, Massachusetts). L'implémentation du logiciel a été effectuée par la société Foliage Software Systems Inc. Le modèle TNM est imposé pour pratiquement tous les projets autoroutiers aux USA (avec le financement de la FHWA).

### 2.2.2 Modélisation des sources

La banque de données à la base du modèle de sources est constitué par 6000 mesurages du passage de véhicules effectués à 15m de l'axe du véhicule entre 1993 et 1995 dans 9 États fédéraux. Ce modèle distingue cinq catégories différentes de sources de bruit routier (voitures particulières, véhicules utilitaires légers, poids-lourds, bus, motos), pour lesquels des valeurs d'émission différentes sont fournies. Les valeurs d'émission sont indiquées sous formes de spectres en 1/3 octave pour deux sources partielles et elles prennent en compte les paramètres suivants:

- vitesse
- revêtement (quatre types)
- déclivité (oui / non)
- écoulement du trafic (uniforme / accéléré)

### Niveau d'émission pondéré A en fonction de la vitesse

Les niveaux d'émission d'une catégorie donnée de véhicule en fonction de la vitesse se réfèrent au niveau maximum relevé à une distance de 15 m lors du passage du véhicule. Dans une première étape, on indique le niveau acoustique global, pondéré A. La dépendance de la vitesse s'exprime comme suit:

$$L_{\max,15m,A}(v) = 10 \log(C + Bv^A) \quad (2.1)$$

avec

$A, B, C$  constantes  
 $v$  vitesse.

### Spectre d'émission par tiers d'octave

A partir du niveau pondéré A (décrit par 3 constantes), on réalise un découpage en 1/3 octave, l'allure du spectre étant décrite par un polynôme du 6ème degré. Les coefficients du polynôme dépendent de la vitesse selon une fonction linéaire. La représentation spectrale du niveau pondéré a fait ainsi appel à 14 constantes ( $D1, D2, E1, E2 \dots J1, J2$ ). Pour chaque catégorie de véhicule et chaque type de revêtement il existe deux niveaux d'émission. L'un s'applique au mouvement uniforme, l'autre au mouvement accéléré. Dès lors, la description de l'ensemble des niveaux d'émission nécessite 680 (5 catégories x 4 revêtement x 17 x 2) constantes.

### Sources partielles

Les valeurs d'émission relative à chacune des catégories de véhicule sont scindées en deux sources partielles, situées à des hauteurs différentes. Ces hauteurs sont, respectivement de 0 m et 1.5 m pour les véhicules légers, les utilitaires légers, les bus et les motos et de 0 m et 3 m 66 pour les poids-lourds. Le découpage des valeurs d'émission dépend de la catégorie de véhicule, du revêtement, de

l'écoulement du trafic (uniforme / accéléré) et de la fréquence, mais pas de la vitesse. Les valeurs retenues pour la hauteur des sources est le résultat d'investigations avec des réseaux de microphones.

### **Déclivités**

La prise en compte de déclivités ne s'opère que dans le cas des poids-lourds, sous la forme de l'alternative oui / non. Ainsi, pour les déclivités pour lesquelles la vitesse donnée ne peut pas être atteinte, on utilise, dans la formule d'émission, la constante d'accélération (plein gaz) en lieu et place du terme indépendant de la vitesse. Il en résulte, aux faibles vitesses, une élévation de niveau sonore de 5 dB (discontinuité).

### **Écoulement irrégulier du trafic**

En plus de la situation correspondant à un trafic régulier, le modèle traite des tronçons où l'écoulement du trafic est accéléré ou ralenti, par ex. au démarrage suivant un signal Stop ou lors d'un changement de pente, dans le cas des poids-lourds. Le modèle définit la dépendance en fonction de la vitesse pour chacune des catégories de véhicule. Pour des accélérations positives, on utilise dans la formule d'émission la valeur constante correspondant à une accélération (plein gaz), jusqu'à ce que la vitesse finale soit atteinte.

## **2.2.3 Modèle de propagation**

Le modèle de propagation s'articule selon une géométrie verticale et une géométrie horizontale. Dans un premier temps, la route est découpée en petits segments pouvant chacun être représenté par une source ponctuelle. Dans un deuxième temps, on analyse la géométrie verticale entre les sources ponctuelles représentant les segments et les points récepteurs. Les atténuations dues à la propagation sont calculées dans la coupe par bande de 1/3 octave. Ce calcul prend en compte:

- la décroissance géométrique
- l'absorption de l'air
- l'effet de sol
- l'effet d'écran de parois et digues
- l'effet d'écran de rangées de maisons
- l'atténuation due à des forêts
- l'augmentation de niveau résultant de réflexions simples sur des parois
- l'augmentation de niveau résultant de réflexions multiples sur des parois parallèles

### **Distribution des sources sur l'axe routier**

TNM décompose les tronçons de route en segments, lesquels peuvent être représentés par un point. Cette segmentation se fait pour chaque point récepteur séparément. A cet effet, on trace, dans le plan  $xy$ , un rayon partant de chaque point récepteur, à travers chaque élément d'entrée (tronçon de route, obstacle, topographie ...), vers le segment de route considéré. Si l'angle entre deux rayons voisins dépasse une certaine limite, un rayon supplémentaire est généré. Cette limite est de l'ordre de grandeur de quelques degrés. Sur la base du modèle de source et de l'angle entre segments, on détermine une valeur d'émission appropriée. L'atténuation sur le chemin de propagation se calcule en déterminant, dans le plan vertical, l'atténuation due à la propagation entre chacune des extrémités du segment et le point récepteur. La moyenne des résultats obtenus est la valeur représentative pour le segment considéré.

### **Absorption de l'air**

TNM calcule l'absorption de l'air selon ISO 9613-1. L'utilisateur peut introduire la température et l'humidité de l'air. Le calcul dans TNM fait appel aux formules contenues dans la norme.

### **Effet de sol, obstacles**

L'effet de sol (réflexions par le sol) et d'obstacle sont traités en bloc dans TNM. Dans le cas le plus simple, le sol est constitué par une surface plane, homogène. A côté du son direct, il existe un seul chemin supplémentaire - la réflexion par le sol. TNM autorise la prise en compte de deux types de discontinuités du sol. L'une est constituée par des accidents de terrain, c'est-à-dire des discontinuités du profil, l'autre se rapporte à des changements dans l'impédance du sol. Lorsqu'une discontinuité apparaît, TNM introduit

un point de diffraction. Le modèle génère tous les chemins conduisant de l'émetteur vers le récepteur, soit en direct, par le point de réflexion au sol et par le point de diffraction. Pour chaque chemin, l'amplitude et la phase de la pression acoustique sont déterminés. Enfin, une sommation des contributions s'effectue à l'emplacement du récepteur. La pression acoustique d'un chemin s'obtient à partir d'un produit de coefficients de réflexion et de diffraction. Les coefficients de réflexion se déterminent à partir de la solution classique du problème de la réflexion d'une source ponctuelle sur une impédance. Les types de sol considérés dans TNM sont caractérisés par leur résistance à l'écoulement et sont transformés en valeur d'impédance en utilisant la relation de Delany<sup>4</sup>. Les coefficients de diffraction applicables dans le cas respectivement d'accidents de terrain ou d'obstacles sont basés sur une solution proposée par Pierce<sup>5</sup>. Les coefficients de diffraction relatifs aux points présentant des sauts d'impédance se déterminent par la formule empirique de De Jong<sup>6</sup>. Celle-ci ramène le problème au cas de l'écran et multiplie les coefficients de diffraction résultants par la différence des coefficients de réflexion des deux couches contiguës.

L'introduction systématique de points de diffraction mène souvent à un nombre considérable de chemins entre émetteur et récepteur. TNM met à disposition deux mécanismes permettant de limiter l'effort. La première mesure consiste à aplanir le terrain. Pour ce faire, on élimine tout point de topographie dont la perpendiculaire sur la droite reliant deux points voisins ne dépasse pas une distance limite  $d_{max}$ . La seconde mesure élimine un point de diffraction  $P_j$  s'il subsiste une liaison directe entre ses deux voisins  $P_i$  et  $P_k$  sur le chemin de propagation et que la différence de chemin  $d = P_i P_k - ((P_i P_j) + (P_j P_k))$  est inférieure à  $-0.15\lambda$  ( $\lambda$ : longueur d'onde). Ceci revient à ignorer des obstacles à effet négatif marqué.

### Effet d'écran de rangées de maisons

L'effet d'écran d'immeubles situés devant un point récepteur se trouvant en seconde rangée se calcule de manière globale. Une rangée de maisons se caractérise par son degré de construction (pourcentage de la rangée occupé par des immeubles) et par la hauteur de construction. En outre, on lui attribue une épaisseur pratiquement nulle et elle ne constitue pas un obstacle sur le chemin de propagation. La réduction du bruit se calcule par le procédé des Chemins de fer allemands. Cela consiste à calculer, dans un premier temps l'effet d'obstacle d'une rangée ininterrompue d'immeubles pour chaque bande de tiers d'octave. L'affaiblissement est ensuite réduit en fonction du degré de construction. L'effet maximum est limité à 10 dB.

### Atténuation par la forêt

L'atténuation par la forêt se calcule selon ISO 9613-2. La norme fournit de valeurs par bande d'octave. TNM utilise la valeur correspondant à l'octave pour chacune des bandes de tiers d'octave.

### Réflexions sur des parois

TNM calcule l'effet de l'image de la source pour chacune des sources (tronçon de route) et pour chaque point récepteur. Un coefficient d'absorption peut être défini en l'espèce.

### Écrans de chaque côté de la route

TNM propose un module distinct pour le cas de deux écrans parallèles, situés de chaque côté de la route. La diminution de l'effet d'écran consécutif aux réflexions multiples sur les parois parallèles est calculée. Ce calcul prend en compte la position de la source (voie de circulation), l'emplacement des parois et leur coefficient d'absorption, ainsi que la position des récepteurs. Le cheminement des rayons sonores est déterminé en deux dimensions. La sphère du récepteur présente un diamètre de 0.3 m et 10'000 rayons sont émis à partir de chaque source. Dans le cas de rayons passant à proximité de l'arête de l'obstacle et qui frappent la paroi, on utilise un calcul de diffraction simplifié. A cet effet, on simule les situations réciproques (source → source miroir, zone de la paroi → zone libre, zone libre → zone de la paroi) en ramenant le problème au cas de la diffraction sur un obstacle. Les résultats ainsi obtenus ne sont pas satisfaisants ce qui rend nécessaire un calibrage supplémentaire.

4. M. E. Delany, E. N. Bazley, Acoustical Properties of Fibrous Absorbent Materials, Applied Acoustics, 3, p.105-116 (1970).

5. A. D. Pierce, Diffraction of sound around corners and over barriers, Journal of the Acoustical Society of America 55, p.941-955 (1974).

6. B. A. De Jong, Propagation of Sound Over Grassland and Over an Earth Barrier, J. Sound and Vib. 86, p.23-46 (1983).

## Facteurs météorologiques

TNM admet l'hypothèse d'une atmosphère homogène et neutre (pas de gradients) et ignore l'influence de facteurs météo.

## 2.3 Modèle scandinave Nord2000

### 2.3.1 Préambule

A la fin des années 90, un groupe de travail scandinave, sous la houlette de DELTA Danish Electronics, Light & Acoustics, a développé le modèle de calcul du bruit routier Nord2000<sup>7</sup>. Le modèle s'applique à l'ensemble des situations de propagation du son à l'extérieur, entre une source ponctuelle et un point récepteur; il est complété par un modèle de source particulier.

### 2.3.2 Modèle de propagation

Le modèle de propagation se fonde sur les lois de l'acoustique géométrique, en faisant appel à la théorie ondulatoire pour le calcul de l'effet de sol et l'effet d'obstacle. Les calculs sont effectués par bandes de tiers d'octave et prennent en compte les aspects suivants:

- décroissance géométrique
- absorption de l'air
- effets de la propagation sur le sol et en présence d'obstacles
- effet de la propagation dans les zones de diffusion
- amplification provoquée par des réflexions sur des parois ou des objets

Ces aspects sont considérés séparément et ils peuvent ainsi être calculés individuellement et leur action conjointe être obtenue par sommation. Dans le cas de sources en mouvement, le modèle Nord2000 apporte une simplification dans le calcul, dans le sens que le calcul de l'effet de sol et d'obstacle se fait uniquement en coupe, ce qui signifie que, par l'effet de la moyenne opérée sur un passage, la diffraction sur des arêtes verticales n'est pas prise en compte.

#### Absorption de l'air

Nord2000 calcule l'absorption de l'air selon ISO 9613-1. Une formule de correction permet de déduire la valeur de l'absorption pour une bande de tiers d'octave donnée à partir des coefficients valables pour des sons purs. L'atténuation pour des bandes de tiers d'octave se situe légèrement en dessous des valeurs pour les sons purs correspondant à la fréquence centrale du tiers d'octave, l'écart ne devenant significatif qu'à partir d'une atténuation d'environ 20 dB ( $\rightarrow$  0.6 dB). Étant donné que ISO 9613-1 n'indique aucune valeur d'absorption de l'air en dessous de 50 Hz, cet effet est ignoré dans cette plage de fréquence.

#### Effet de sol, obstacles

L'effet de sol (interférence entre le son direct et le son réfléchi par le sol) et l'effet d'obstacles font l'objet d'un traitement exhaustif dans Nord2000. Le point de départ est une coupe bidimensionnelle dans le terrain, pouvant se représenter par un tracé polygonal. La ligne de visée source - récepteur peut être déplacée par l'effet du terrain ou d'obstacles artificiels. Seules deux arêtes d'obstacles significatives, au maximum, sont prises en compte.

Comme la quantité de calculs dépend fortement du nombre de segments de terrain, celui-ci fait l'objet, dans un premier temps d'un lissage adéquat. La topographie est tout d'abord morcelée grossièrement, puis le découpage est affiné jusqu'à obtention du niveau de détail souhaité.

Le point de départ du calcul de l'effet de sol consiste en la résolution du cas d'une source ponctuelle sur un sol homogène. Cette solution peut s'étendre aux cas général d'un sol inhomogène et non plan en faisant appel à un concept développé par Hothersall et Harriot<sup>8</sup> et basé sur les zones de Fresnel. Selon ce procédé, on calcule, respectivement les contributions afférentes aux divers types de sol et aux différents segments de terrain, en prenant en compte des facteurs de pondération proportionnels à l'aire

7. <http://www.delta.dk/nord2000/>

8. D. C. Hothersall, J. B. N. Harriott, Approximate models for sound propagation above multi-impedance plane boundaries, Journal of the Acoustical Society of America, vol. 97, p.918-926 (1995).

respective du sol d'un type donné et à la grandeur du segment situé à l'intérieur de la zone de Fresnel FZ. Dans ce cas, FZ ne se détermine pas, comme habituellement, comme la région comprenant des longueurs de rayon réfléchi à l'intérieur d'un  $1/2 \lambda$  ( $\lambda$ : longueur d'onde), mais, suivant les cas, à l'intérieur d'une région  $1/4 \lambda$  ou  $1/8 \lambda$ . Afin d'éviter de travailler avec la forme elliptique, plus compliquée, on utilise l'approximation par un rectangle. En dérogation au modèle Hothersall et Harriot, le facteur de pondération dépendant de la fréquence est légèrement modifié afin d'obtenir des résultats plus proche de ceux des modèles élaborés. Une particularité de Nord2000 consiste à prendre en compte, en plus de la résistance à l'écoulement (ou l'impédance), un facteur de rugosité. Ce dernier se calcule à partir de l'écart type de la hauteur du sol le long d'un segment. L'effet de la rugosité se traduit par une certaine perte de cohérence de la réflexion au sol, par rapport au son direct. Toutefois, cet aspect n'a pas encore été validé sur la base de mesurages. Le modèle indique la résistance à l'écoulement pour sept types de terrain différents. La valeur de l'impédance se déduit de la résistance à l'écoulement sur la base du modèle classique, à un paramètre, de Delany et Bazley<sup>9</sup>.

Lors du calcul de l'effet de sol et de l'effet d'obstacle, on distingue trois situations

- flat terrain model
- valley model
- hill model

ou des formes mixtes de celles-ci. Selon la situation, on utilise l'un ou l'autre procédé de calcul. La prise en compte des effets de diffraction se fonde sur une solution de Hadden et Pierce<sup>10</sup>.

Dans la réalité, la superposition du son direct et de la réflexion par le sol ne se fait pas de manière totalement cohérente. Cet aspect est pris en compte par l'introduction d'un "coefficient de cohérence". On considère alors la contribution  $F$  de la pression acoustique, qui se superpose de manière cohérente, c'est à dire en tenant compte de la phase. Pour les divers phénomènes susceptibles de réduire la cohérence, on fait appel à des formules empiriques, lesquelles ne sont pas encore complètement validées par des mesurages.

### Facteurs météorologiques

Nord2000 propose une méthode faisant appel à des chemins sonores courbes, s'agissant du calcul de la propagation du son dans des conditions de gradient modéré de la vitesse du son. La principale simplification opérée consiste à admettre des gradients linéaires, c'est à dire une variation linéaire de la vitesse de propagation en fonction de l'altitude. Ceci conduit à des chemins sonores circulaires, dont le traitement analytique est relativement aisé<sup>11</sup>. Un gradient modéré a, à cause de la propagation curviligne, pour corollaire une variation calculable de l'amplitude et de la phase, tant du son direct que des réflexions par le sol. L'amplitude du son direct se modifie peu étant donnée une distance de propagation importante. La phase varie en fonction de la modification du temps de propagation. Dans le cas de l'effet d'obstacle, il y a lieu de tenir compte, en plus, des modifications des angles de diffraction. Lors du calcul des réflexions par le sol, il faut considérer que le coefficient de réflexion de l'onde sphérique  $Q$  change, suite à la modification de l'angle d'incidence sur le sol. Nord2000 présente également un procédé de calcul pour les gradients élevés, par exemple dans le cas où des zones d'ombre ou encore des réflexions supplémentaires par le sol seraient créées.

## 2.4 Évaluation des algorithmes et conséquences pour SonRoad

Avec la norme ISO 9613-2<sup>12</sup>, nous disposons, en principe d'un modèle d'ingénierie complet pour le calcul de la propagation du son. Il décrit le calcul du bruit produit en un point récepteur par une source ponctuelle, en tenant compte de facteurs météorologiques favorisant la propagation. Le calcul se fait par bandes d'octave et il prend en compte la décroissance géométrique, l'absorption de l'air, l'effet de sol, l'effet d'obstacle, l'effet d'une couche de végétation, de même que la réflexion sur des surfaces.

9. M. E. Delany, E. N. Bazley, Acoustical properties of fibrous absorbent materials. Applied Acoustics vol. 3, p.105-116 (1970).

10. J. W. Hadden, A. D. Pierce, Sound diffraction around screens and wedges for arbitrary point source locations, Journal of the Acoustical Society of America, vol. 69, p.1266-1276 (1981).

11. A. L'Esperance et. al., Heuristic model for outdoor sound propagation based on an extension of the geometrical ray theory in the case of a linear sound speed profile, Applied Acoustics, vol. 37, p.111-139 (1992).

12. ISO 9613-2 Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors, Part 2: General method of calculation (1996).

La faiblesse manifeste de ISO 9613-2 se situe au niveau de l'effet de sol. Le calcul élaboré, par bandes d'octave, ne s'applique qu'au cas d'un sol plat. Dans le cas général, on doit faire appel à une formule empirique ne permettant d'obtenir qu'une indication en terme de niveau pondéré A, en se basant sur la hauteur moyenne de propagation sur le sol et sur la distance. Un autre aspect critique réside dans la combinaison de l'effet de sol et de l'effet d'obstacle. En présence de l'effet d'obstacle, l'effet de sol, calculé selon ISO 9613-2, ne doit pas être pris en compte. En particulier, dans le cas où la distance resp. obstacle - récepteur ou source - obstacle est importante, ceci apparaît comme invraisemblable et il peut en résulter des discontinuités considérables. Il en résulte que le nouveau modèle SonRoad peut s'orienter en gros sur ISO 9613-2, en empruntant toutefois une nouvelle voie pour ce qui a trait à l'effet d'obstacle. Dans ce contexte, les divers modèles évoqués précédemment n'ont pas tous la même portée. Le modèle français s'en tient au calcul de l'effet de sol selon ISO 9613-2, en imposant des restrictions à la forme du terrain, de sorte que la méthode élaborée soit généralement applicable. Les modèles américain et nordique utilisent la même solution numérique pour ce qui concerne la propagation des ondes sur un terrain homogène. Au vu des capacités de calcul disponibles actuellement, une telle mise en oeuvre paraît se justifier. Ainsi, SonRoad fait appel à cette méthodologie pour le calcul des réflexions par le sol. Pour l'extension du procédé au cas d'un terrain quelconque, inhomogène, de même que pour la prise en compte d'obstacles, les approches américaine et nordique divergent. Étant donné que chacun des deux procédés est relativement compliqué, une voie différente a été choisie pour SonRoad. L'effet d'obstacle se calcule rigoureusement selon ISO 9613-2, alors que les réflexions supplémentaires sont calculées séparément. Le terrain quelconque est ramené au cas du terrain plan, homogène en faisant appel à un concept de zones de Fresnel. Ce concept est partiellement appliqué dans le modèle Nord 2000 et il conduit à une solution fiable.

## **2.5 Évaluation des algorithmes et conséquences pour SonRoad**

Les caractéristiques principales des modèles de calcul évoqués, ainsi que de la nouvelle méthode SonRoad sont résumées dans le tableau 2.1.

	XP S31-133	TNM	Nord2000	ISO 9613	StL-86	SonRoad
<i>Modèle de source</i>						
Hypothèse des sources linéaires					x	
Hypothèse des sources ponctuelles	x	x				x
Hauteur de la source [m]	0.5	0.0...3.66			0.8	0.45
Formule pour l'émission : tous les bruits					x	
Formule pour l'émission : VL/PL		x				x
Formule pour l'émission : bruits moteur/roulement						x
Formule pour l'émission : f(vitesse)		x			x	x
Formule pour l'émission : f(pente)		x			x	x
Formule pour l'émission : f(écoulement du trafic)		x				
Formule pour l'émission : f(revêtement)		x			(x)	x
Formule pour l'émission : niveau pond. A					x	
Formule pour l'émission : 1/3 octave		x				x
<i>Modèle de propagation</i>						
Amortissement (dû à la propagation) pondéré A					x	
Amortissement par octaves	x			x		
Amortissement par 1/3 octave		x	x			x
Absorption de l'air selon ISO 9613-1	x	x	x	x		x
Effet de sol empirique	x(1)			x	x	
Effet de sol selon théorie ondulatoire		x	x			x
Effet de sol = f(nature du sol)	x(2)	x	x	x(2)		x
Effet d'obstacle empirique	x			x	x	x
Effet d'obstacle selon théorie ondulatoire		x	x			
Réflexions simples sur les parois	x	x	x	x		x
Réflexion simple : f(dimension, fréquence)			x	x(3)		x
Réflexion simple : f(absorption)		x	x	x		x
Réflexions multiples		x(4)				
Atténuation par la forêt		x	x	x		x
Effet de sol : f(météo)	x		x(5)			
Effet d'obstacle : f(météo)	x		x(5)	x		x

(1) ISO 9613-2 mais seul. sol plan

(2) seul. différenciation dur/mou

(3) seul. alternative oui/non

(4) utilise l'algorithme ray tracing

(5) selon hypothèse des gradients constants

TAB. 2.1 – Comparatif des caractéristiques principales des différents modèles de calcul pour le bruit du trafic routier.



# 3 Le modèle de calcul SonRoad

## 3.1 Hypothèses à la base du modèle SonRoad

Le bruit du trafic routier est causé par les émissions en provenance de véhicules qui, en principe, sont en mouvement. Le déplacement des véhicules est découpé en tronçons élémentaires. Le milieu de chacun des tronçons représente alors le centre d'une source ponctuelle, dont l'énergie sonore est proportionnelle à la longueur du segment considéré. La propagation du son se calcule alors entre chaque source ponctuelle et le point d'immission. L'atténuation due à la propagation s'obtient sur la seule base d'une coupe verticale. On ne prend pas en compte la diffraction sur les arêtes d'obstacles verticales. Cette simplification est généralement acceptable pour le cas de sources linéaires. Les images des différentes sources ponctuelles par rapport au sol et aux surfaces réfléchissantes sont déterminées. Il en résulte des chemins de propagation supplémentaires entre les points images et le point d'immission. Les phénomènes liés à la propagation du son étant, en partie, dépendant de la fréquence, les calculs de propagation doivent s'effectuer en tiers d'octave. Les niveaux sonores par tiers d'octave résultant des calculs sont finalement additionnés pour obtenir un niveau équivalent pondéré A.

Le calcul du bruit résultant du trafic routier se compose de deux modules. L'un d'eux, le modèle de sources, permet de déterminer respectivement la puissance ou l'énergie acoustique rayonnée en fonction de la configuration particulière. L'autre module, le modèle de propagation, calcule l'atténuation due à la propagation entre la source ponctuelle et le point d'immission et détermine le niveau global au point d'immission sur la base des contributions de chaque chemin. Dans le descriptif qui suit, les formules et tableaux les plus importants sont mis en évidence par des caractères gras.

## 3.2 Déroulement typique d'un calcul d'exposition au bruit routier

Le calcul d'immission au bruit du trafic comporte les étapes suivantes:

- définition de la géométrie
- découpage de la route / des voies de circulation en sources ponctuelles
- détermination de la puissance / de l'énergie de chaque source ponctuelle pour chaque catégorie de véhicule en fonction de la densité du trafic, de la longueur du tronçon représentatif, de la vitesse, de la déclivité de la route et du revêtement
- détermination des cheminements du son (y compris du son réfléchi) à partir de chacune des sources jusqu'au point d'immission
- calcul de l'atténuation due à la propagation par tiers d'octave
- calcul du niveau équivalent pondéré A par sommation des valeurs par tiers d'octave
- calcul du niveau d'évaluation.

## 3.3 Modèle de source

### 3.3.1 Intensité de la source

#### Généralités

S'agissant des véhicules à moteur à essence ou diesel, on distingue deux types de bruit. Un premier type est constitué par les bruits liés à la propulsion. Ceux-ci proviennent essentiellement du moteur, des engrenages et des systèmes d'admission et d'échappement. Les bruits de propulsion dépendent du genre de moteur et des conditions de fonctionnement de celui-ci. Pour un moteur donné, les bruits de propulsion dépendent, en premier lieu, du régime et, dans une moindre mesure, de la charge. Par contre, ce type de bruit n'est pas fonction de la vitesse du véhicule. L'autre type de bruit comprend les émissions liées au roulement. Il s'agit des bruits produits par le roulement des pneumatiques sur la chaussée. Le bruit de roulement est fonction du véhicule ( poids, largeur profil du pneu), du revêtement et de la vitesse. Le bruit de roulement comprend d'éventuels bruits aérodynamiques. Ceux-ci sont toutefois négligeables

dans la majorité des cas. La figure 3.1 montre les facteurs déterminants pour l'émission sonore d'un véhicule.

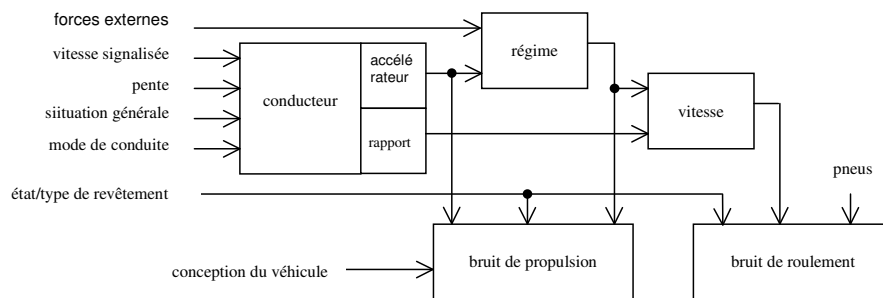


FIG. 3.1 – Schéma synoptique des éléments déterminants pour le bruit émis par un véhicule.

Il s'agit de modéliser séparément les deux types de bruit (bruit de propulsion / de roulement) pour obtenir un modèle de source du bruit du trafic routier. Cette approche permet une modélisation plus fine des éléments déterminants, tels que pente ou revêtement, qui ne concernent vraiment qu'une des composantes du bruit. Le trafic observable sur les routes présente une composition très disparate. Un modèle idéal devrait prendre en compte un découpage relativement fin des catégories de véhicules. Or un tel modèle ne se révèle pas très utile dans la pratique, si l'on ne dispose pas de comptage de trafic précis. C'est la raison pour laquelle on a travaillé, jusqu'à présent, sur la base de deux catégories : les véhicules légers et les poids-lourds<sup>1</sup>. Toutefois, il faut compter avec une dispersion très importante des paramètres, en particulier dans le cas des poids-lourds. On peut affirmer que les valeurs prises en compte pour une catégorie particulière de véhicules ne constituent que des moyennes, étant donné que l'émission sonore de tel ou tel véhicule dépend d'une multitude de facteurs non quantifiables (Figure 3.1).

La description de l'intensité de la source est basée sur le maximum du niveau de pression acoustique pondéré A produit par le passage d'un véhicule, mesuré à 7.5 m de l'axe du véhicule et à 1.2 m au-dessus du sol. Le dispositif de mesure est décrit en détail, par exemple dans la norme ISO 11819-1<sup>2</sup>. On admet dans ce cas que le sol entre le véhicule et le micro est réfléchissant. Lors d'un mesurage du niveau sonore maximum produit par le passage du véhicule dans des conditions réelles de trafic, on peut satisfaire à cette condition, par ex. en utilisant la voie de circulation éloignée. Sur les autoroutes, comportant une bande d'arrêt d'urgence, cette condition est remplie automatiquement. Le niveau maximum de passage doit correspondre à celui qui serait mesuré au moyen d'un microphone se déplaçant avec le véhicule. Dans le cas d'un micro stationnaire, on détermine une valeur approchée du niveau maximum en utilisant une constante de temps suffisamment courte. Toutefois, l'utilisation d'une constante de temps trop petite conduit à une augmentation marquée de l'erreur aléatoire, à cause du caractère stochastique du signal. La constante de temps FAST (= 125 ms) réalise un bon compromis. Cependant, pour des vitesses élevées, l'inertie de la mesure avec FAST entraîne une sous-estimation de niveau de l'ordre de 0.5 dB. Il faut signaler que le niveau équivalent  $L_{eq}$  comporte, en outre, une dépendance négative de  $10 \log(v)$  (avec  $v$  = vitesse du véhicule) par rapport au niveau maximum de passage, c'est-à-dire que la dépendance de la vitesse est plus faible pour le  $L_{eq}$  que pour le niveau maximum de passage.

### Dépendance de la vitesse

Sur la base de nombreux mesurages effectués par l'EMPA<sup>3,4</sup> sur une chaussée asphaltée, horizontale, on a déduit les niveaux maxi suivants durant le passage d'un véhicule:

1. OPB, Ordonnance suisse sur la Protection contre le Bruit, annexe 3, chiffre 32, état 3 juillet 2001.  
 2. ISO 11819-1 Acoustics - Method for measuring the influence of road surfaces on traffic noise - Part 1: Statistical pass-by method (1997).  
 3. A. Rosenheck, K. Heutschi, Bericht zum F+E-Projekt Neues EMPA-Modell für Strassenlärm: Teil Quellenbeschreibung, EMPA Nr. 156'479 (1997).  
 4. K. Heutschi, Ein aktualisiertes Strassenlärmquellenmodell, Schweizer Ingenieur und Architekt, S. 26-30, Nr. 39, 1. Oktober 1999.

	bruit de roulement	bruit de propulsion
véhicules légers	$9.5 + 35.0 \log(v)$	$62.7 + 10 \log \left( 1 + \left( \frac{v}{44.0} \right)^{3.5} \right)$
poids-lourds	$18.5 + 35.0 \log(v)$	$76.9 + 10 \log \left( 1 + \left( \frac{v}{56.0} \right)^{3.5} \right)$

TAB. 3.1 – Niveau maximum lors du passage d'un véhicule sur sol réfléchissant en dB(A), en fonction de la vitesse  $v$  en km/h, mesuré à 7.5 m de distance et à 1.2 m sur sol. La sous-évaluation systématique aux vitesses élevées, due à la constante de temps FAST, a été corrigée.

### Correction en fonction de la pente

Sur un tronçon présentant une pente positive (montée), le bruit lié à la propulsion s'accroît, selon les résultats des mesurages EMPA précités, de  $\Delta_S$ :

$$\Delta_S = 0.8g \quad [\text{dB(A)}] \quad (3.1)$$

avec

$g$  pente de la chaussée en % et  $g > 0$ .

Sur les tronçons présentant une pente négative (descente), le bruit lié à la propulsion n'est pas modifié. Il faut toutefois tenir compte d'une éventuelle modification de la vitesse, tant pour des pentes positives que négatives.

### Correction en fonction du revêtement

La quantification de l'effet du revêtement sur le bruit émis repose sur des données provenant de tiers. Le Service des Ponts et Chaussées du canton d'Appenzell Rhodes-Extérieures a procédé à des essais concernant le bruit routier à l'intérieur des localités, en particulier avec des revêtements de pavés en granit<sup>5</sup>. Sur la base de passage de véhicules avec une vitesse contrôlée, il a été possible d'établir une relation déterminant la différence de niveau d'émission sonore entre chaussée pavée et chaussée asphaltée en fonction de la vitesse. Les résultats des mesurages sont reproduits avec une précision meilleure que 1 dB lorsque l'on introduit dans le terme lié au bruit de roulement de la formule ci-dessus une correction  $\Delta_{BR} = + 5.6 \text{ dB(A)}$  (Figure 3.2).

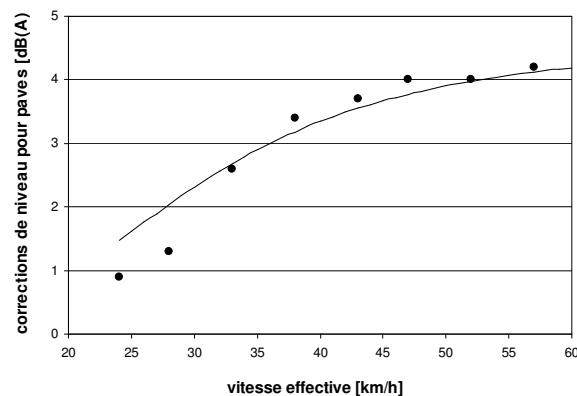


FIG. 3.2 – Comparaison entre la correction à appliquer aux valeurs mesurées pour un pavage (points) et le calcul effectué en appliquant une correction de +5.6 dB(A) au bruit de roulement (ligne continue).

Dans le cas des autres revêtements, le modèle fait appel aux résultats de Grolimund+Partner. Ceux-ci ne s'appliquent en fait qu'au bruit global  $\Delta_{BG}$  et non au seul bruit de roulement. En appliquant une

<sup>5</sup> Hans Peter Rohrer, Ralph Gerschwiler, Strassenlärm im Ortskern, Schweizer Ingenieur und Architekt, Nr. 22, 26. Mai 1994.

logique de vraisemblance, on obtient, à partir des résultats de Grolimund+Partner<sup>6</sup>, les termes correctifs en fonction du revêtement présentés dans le tableau 3.2, l'âge du revêtement se situant entre 3 et 20 ans:

	$\Delta_{BG}$ [dB(A)]	$\Delta_{BR}$ [dB(A)]
<b>enrobé bitumineux (asphalt concrete) AC 8,11,16 (AB 10,11,16)</b>	0	0
<b>béton</b>	+2	0
<b>asphalte drainant (porous asphalt) PA 8,11 (DRA 10,11) pour <math>v &gt; 70</math> km/h</b>	-4	0
<b>asphalte coulé (mastic asphalt) MA 8,11,16 (GA)</b>	0	0
<b>asphalte macro-rugueux AC MR 8,11 (MR 6,11)</b>	-1	0
<b>traitement de surface OB 3/6</b>	0	0
<b>traitement de surface OB 6/11</b>	+1	0
<b>Splittmastixasphalt (stone mastic asphalt) SMA 6</b>	-1	0
<b>Splittmastixasphalt (stone mastic asphalt) SMA 8,11</b>	0	0
<b>enrobé bitumineux grenu SPA 6,8,11</b>	0	0
<b>enrobé avec adjonction de goudron TA 10</b>	0	0
<b>enrobé avec adjonction de goudron TA 16</b>	+1	0
<b>pavage</b>	0	+6

TAB. 3.2 – Corrections en fonction du revêtement applicables, resp. au bruit global  $\Delta_{BG}$  et au bruit de roulement  $\Delta_{BR}$ .

### Spectre du bruit du trafic

Étant donné que l'atténuation due à la propagation du son dépend de la fréquence, il est nécessaire de calculer cette propagation par bandes de fréquences. En conséquence, le modèle de source doit fournir des indications sur la composition fréquentielle du bruit. On se réfère, dans ce cas, à la norme SN EN 1793-3<sup>7</sup> (tableau 3.3).

50 Hz	63 Hz	80 Hz	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz
-	-	-	-20	-20	-18	-16	-15
315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz
-14	-13	-12	-11	-9	-8	-9	-10
2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz	6300 Hz	8000 Hz	10000 Hz
-11	-13	-15	-16	-18	-	-	-

TAB. 3.3 – Spectre du bruit du trafic routier pondéré A, par tiers d'octave en dB selon la norme SN EN 1793-3. La valeur de -12 dB à 500 Hz signifie que la valeur pondérée A dans la bande de 500 Hz se situe à 12 dB en dessous du niveau global pondéré A.

### Effet de sol pour le niveau maximum du bruit de passage dans la configuration standard de mesurage 7.5/1.2 m

Dans le cas du dispositif évoqué plus haut, soit lors du mesurage du niveau de bruit maximum à 7.5 m de distance et à 1.2 m au-dessus d'un sol dur, l'effet de sol modifie le signal microphonique relativement au mesurage en champ libre. Il faut tenir compte du fait que la moyenne flottante réalisée avec la constante FAST produit un certain flou dans la détermination du niveau maximum lors d'un passage à vitesse variable. La définition de l'intensité de la source dans le modèle SonRoad doit correspondre à la situation en champ libre. Afin de calculer la valeur en champ libre à partir du mesurage lors d'un

6. Formulierung einer Belagskorrektur für das neue Strassenlärmmodell SonRoad, Ch. Luther, Grolimund+Partner AG in Aarau, 28. April 2003.

7. SN EN 1793-3, Lärmschutzeinrichtungen an Strassen - Prüfverfahren zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften - Teil 3: Standardisiertes Verkehrslärmspektrum (1997).

passage l'effet de sol a été déterminé au moyen du modèle de propagation décrit ci-dessous.

La figure 3.3 représente le spectre du niveau maximum du bruit de passage d'une source ponctuelle, se déplaçant à 0.45 m sur un sol dur, obtenu par simulation. Le calcul du maximum pour chaque tiers d'octave s'applique à l'instant où la source était la plus proche.

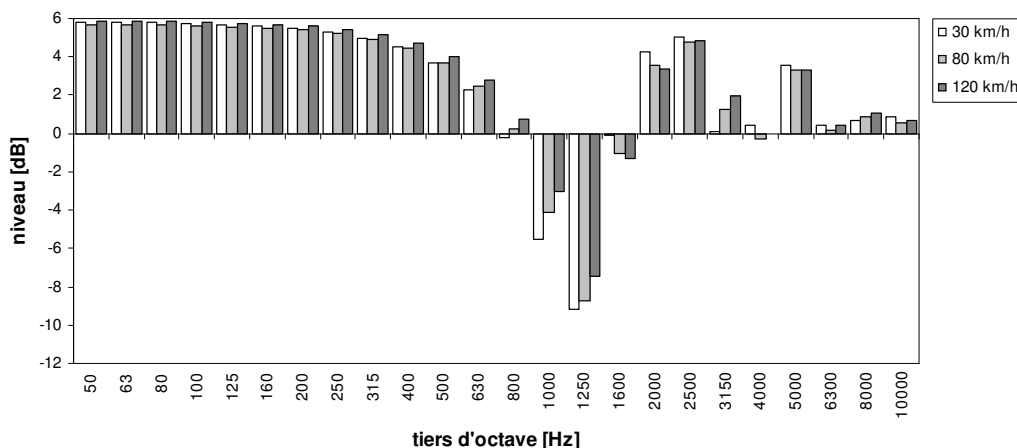


FIG. 3.3 – Spectres par tiers d'octave du bruit maximum calculé, lors du passage d'une source ponctuelle se déplaçant à 0.45 m sur un sol dur à des vitesses de resp. 30, 80 et 120 km/h. Ces valeurs correspondent à une propagation en champ libre, c'est-à-dire qu'un niveau de + 5 dB correspond à une augmentation de 5 dB due à l'effet de sol.

Il ressort de la figure 3.3, en considérant le spectre de niveau sonore du trafic routier du tableau 3.3, que l'augmentation du niveau pondéré A est comprise entre 2.0 et 2.3 dB pour des vitesses de 30, 80 et 120 km/h. Une dépendance de la vitesse aussi minime peut être négligée. Ainsi, l'effet de sol sur le niveau du bruit maximum lors du passage d'un véhicule peut-il être chiffré à 2.2 dB et les valeurs mesurées lors d'un passage, en termes de niveau pondéré A, doivent-elles être réduites de 2.2 dB pour obtenir des résultats correspondant au champ libre - telles qu'elles sont utilisées par le modèle de sources. Les contributions relatives au bruit de propulsion et de roulement du tableau 3.1 se traduisent, dans le cas de la propagation en champ libre, par les niveaux sonores indiqués dans le tableau 3.4.

	bruit de roulement	bruit de propulsion
véhicules légers	$7.3 + 35.0 \log(v)$	$60.5 + 10 \log \left( 1 + \left( \frac{v}{44.0} \right)^{3.5} \right)$
poids-lourds	$16.3 + 35.0 \log(v)$	$74.7 + 10 \log \left( 1 + \left( \frac{v}{56.0} \right)^{3.5} \right)$

TAB. 3.4 – Niveau maximum lors du passage d'un véhicule en dB(A), en fonction de la vitesse en km/h, mesuré à 7.5 m dans des conditions de champ libre.

### Effet de sol pour l'énergie acoustique émise durant un passage dans la configuration standard de mesurage 7.5/1.2 m

Le spectre normalisé du bruit du trafic routier, représenté dans le tableau 3.3, doit s'interpréter comme un spectre de type resp. Leq ou SEL et qui inclut l'effet de sol. Le spectre de source utilisé par SonRoad fait appel à des niveaux en champ libre. En considérant le même dispositif que précédemment, on peut calculer la valeur de l'effet de sol et la soustraire. On se fonde alors sur l'effet de sol énergétique intégré sur tout un passage, tel qu'il ressort de la simulation illustrée dans la figure 3.4.

L'effet de sol représenté dans la figure 3.4 doit être soustrait du spectre de la source (tableau 3.3) de manière à obtenir les valeurs en champ libre requises par le modèle. En normalisant à 0 dB, on obtient le spectre de source figurant dans le tableau 3.5.

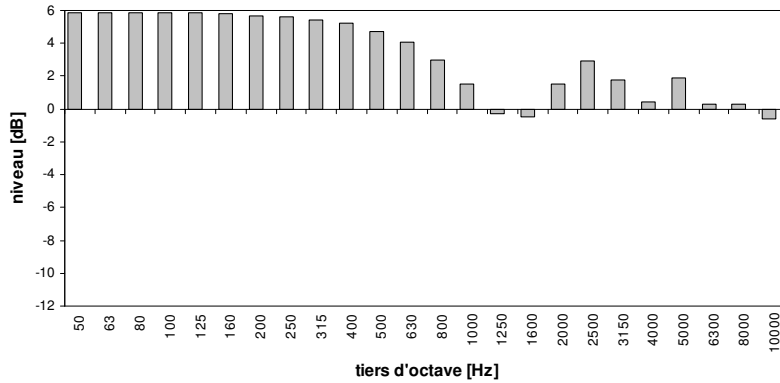


FIG. 3.4 – Spectres par tiers d'octave de l'énergie, calculé lors du passage d'une source ponctuelle se déplaçant à 0.45 m sur un sol dur. Ces valeurs correspondent à une propagation en champ libre, c'est-à-dire qu'un niveau de + 5 dB correspond à une augmentation de 5 dB due à l'effet de sol.

50 Hz	63 Hz	80 Hz	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz
-	-	-	-24.3	-24.3	-22.3	-20.2	-19.1
315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz
-17.9	-16.6	-15.1	-13.4	-10.3	-7.6	-6.6	-7.5
2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz	6300 Hz	8000 Hz	10000 Hz
-10.9	-14.5	-15.5	-15.1	-18.7	-	-	-

TAB. 3.5 – Spectre du bruit du trafic routier pondéré A, par tiers d'octave en dB converti en valeurs pour les conditions de champ libre. La valeur de -15.1 dB à 500 Hz signifie que la valeur pondérée A dans la bande de 500 Hz se situe à 15.1 dB en dessous du niveau global pondéré A.

### 3.3.2 Formulation en termes de puissance de la source

Les données précédentes concernent le niveau sonore produit par le passage d'un véhicule à 7.5 m de distance, en champ libre. La formulation en termes de puissance acoustique  $L_{W,A}$  d'effectue en utilisant l'équation 3.2.

$$L_{W,A} = L_{7.5m, \text{Freifeld}, A} + 20 \log \left( \frac{7.5m}{1.0m} \right) + 10 \log(4\pi) = L_{7.5m, \text{Freifeld}, A} + 28.5 \quad [\text{dB(A)}] \quad (3.2)$$

mit

$L_{W,A}$  niveau de puissance acoustique pondéré A [dB(A)]

$L_{7.5m, \text{Freifeld}, A}$  niveau de pression acoustique pondéré A à 7.5 m de distance [dB(A)]

Les relations suivantes permettent d'obtenir le niveau de puissance acoustique, respectivement pour les véhicules légers  $L_{W,A, \text{PW}}$  et pour les poids-lourds  $L_{W,A, \text{LKW}}$ :

$$L_{W,A, \text{PW}} = 28.5 + 10 \log \left( 10^{0.1(7.3 + 35 \log(v) + \Delta_{BR})} + 10^{0.1(60.5 + 10 \log(1 + (\frac{v}{44})^{3.5}) + \Delta_S)} \right) + \Delta_{BG} \quad (3.3)$$

avec

$v$  vitesse du véhicule léger en [km/h]

$\Delta_{BR}$  correction pour le bruit de roulement sur un revêtement donné, selon tableau 3.2 [dB(A)]

$\Delta_{BG}$  correction pour le bruit global sur un revêtement donné, selon tableau 3.2 [dB(A)]

$\Delta_S$  correction pour la pente, selon éq. 3.1 [dB(A)]

$$L_{W,A,LKW} = 28.5 + 10 \log \left( 10^{0.1(16.3 + 35 \log(v) + \Delta_{BR})} + 10^{0.1(74.7 + 10 \log(1 + (\frac{v}{56})^{3.5}) + \Delta_S)} \right) + \Delta_{BG} \quad (3.4)$$

avec

$v$	vitesse du poids-lourd en [km/h]
$\Delta_{BR}$	correction pour le bruit de roulement sur un revêtement donné, selon tableau 3.2 [dB(A)]
$\Delta_{BG}$	correction pour le bruit global sur un revêtement donné, selon tableau 3.2 [dB(A)]
$\Delta_S$	correction pour la pente, selon éq. 3.1 [dB(A)]

### Exemple chiffré

Un véhicule léger roule à 80 km/h sur une route plate. Le niveau de puissance acoustique, selon éq. 3.3, s'élève à  $L_{W,A,PW}$  103.9 dB(A). En calculant par tiers d'octave, selon le tableau 3.5, on obtient un niveau de puissance acoustique de  $103.9 - 24.3 = 79.6$  dB pour la bande de 100 Hz, de  $103.9 - 24.3 = 79.6$  pour la bande de 125 Hz, de  $103.9 - 22.3 = 81.6$  pour la bande de 160 Hz, etc.

### 3.3.3 Calcul du niveau équivalent $Leq$ à partir du niveau maximum de passage

En utilisant l'hypothèse simplificatrice selon laquelle un véhicule à caractéristique de rayonnement cylindrique se déplace à vitesse constante sur une route longue et rectiligne, visible de  $-\infty$  à  $+\infty$ , et en ne considérant aucune atténuation si ce n'est la décroissance géométrique, on peut calculer comme suit le niveau équivalent  $Leq$  résultant du passage d'un véhicule par heure à partir du niveau maximum de passage :

$$Leq_{1Fz/h,A} = 10 \log \left( \frac{1}{3600} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{p_{Q,A}^2}{p_0^2(d^2 + (v't)^2)} dt \right) \quad (3.5)$$

avec

$p_{Q,A}$	maximum de la valeur efficace de la pression acoustique pondérée A lors d'un passage, à 1m de distance [Pa]
$p_0$	valeur efficace de pression acoustique de référence = 2E-5 Pa
$v'$	vitesse du véhicule [m/s]
$d$	distance récepteur / voie de circulation [m]
$t$	temps [s]

en posant  $dt = \frac{dx}{v'}$  on obtient

$$Leq_{1Fz/h,A} = 10 \log \left( \frac{p_{Q,A}^2}{3600v'p_0^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{d^2 + x^2} dx \right) = 10 \log \left( \frac{p_{Q,A}^2 \pi}{3600v'dp_0^2} \right) \quad [dB(A)] \quad (3.6)$$

A la vitesse  $v$  [km/h], on a alors

$$Leq_{1Fz/h,A} = L_{\max,7.5m,A} - 10 \log(v) - 10 \log(d) - 7.5 \quad [dB(A)] \quad (3.7)$$

avec

$L_{\max,7.5m,A}$	niveau maximum pondéré A lors du passage d'un véhicule, à 7.5 m [dB(A)]
$v$	vitesse du véhicule [m/s]
$d$	distance récepteur / voie de circulation [m]

Il faut remarquer que la valeur  $Leq_{1Fz/h,A}$  calculée à partir de l'éq. 3.7 présente un minimum ne correspondant pas à la vitesse 0. Le minimum est sensiblement plat et correspond à  $v = 23$  km/h pour les véhicules légers et  $v = 32$  km/h pour les poids-lourds.

### 3.3.4 Hauteur de la source

La hauteur de la source de bruit constitue un facteur déterminant lors du calcul de l'effet de sol et, plus encore, pour la détermination de l'effet d'obstacle. Les résultats de travaux récents, effectués dans le cadre d'un programme de recherche OFROU<sup>8</sup>, montrent que la source du bruit du trafic routier se situe nettement plus bas que les 0.8 m pris en compte jusqu'à présent dans le modèle StL-86. Ces résultats indiquent une hauteur de 0.4 m pour les véhicules légers et de 0.5 m pour les poids lourds. L'utilisation de deux hauteurs de source différentes a pour conséquence de doubler la quantité de calculs de propagation à effectuer. Une telle augmentation du volume de calcul n'apparaît pas justifiée, de sorte que l'on utilise qu'une seule hauteur de source, soit 0.45 m au-dessus de la surface de la chaussée. Il faut remarquer que cette nouvelle définition de la hauteur de la source n'est pas conforme à l'Ordonnance sur la Protection contre le Bruit dans sa forme actuelle.

### 3.3.5 Vitesse effective de circulation

Ce modèle de calcul de l'émission admet que la vitesse effective de circulation des véhicules est introduite dans la formule de source. D'une manière générale, il y a lieu de prendre en compte des vitesses différentes pour les véhicules légers et pour les poids-lourds. Il faut remarquer que la formule d'émission s'applique à une circulation libre, à vitesse constante, c'est-à-dire que les effets de freinage et d'accélération ne sont pas modélisés de manière explicite. En l'absence de données concernant la vitesse effective de circulation, on peut utiliser les approximations suivantes<sup>9</sup>:

**Dans les localités, vitesse 30 km/h** Les tronçons à 30 km/h peuvent être aménagés de manières très différentes, d'où des vitesses de circulation pouvant varier. Même si des dispositifs de modération du trafic peuvent réduire à une vitesse moyenne nettement inférieure à la valeur nominale, on utilisera une vitesse de, au minimum, 30 km/h, afin de tenir compte des accélérations.

**Dans les localités, vitesse 50 km/h** Sur les tronçons à 50 km/h, on observe généralement une vitesse moyenne inférieure à la vitesse nominale. Toutefois, pour tenir compte d'un écoulement non stationnaire du trafic, on calculera les émissions sur la base de 50 km/h.

**Hors des localités, vitesse 80 km/h** Les études réalisées en matière de vitesse de circulation en différents endroits montrent que la vitesse effective des véhicules est, en moyenne, de 83/86 km/h pour les véhicules légers resp. jour/nuit et de 78/82 km/h pour les poids lourds, resp. jour/nuit.

**Hors des localités, vitesse 100 km/h** Les études réalisées en matière de vitesse de circulation en différents endroits montrent que la vitesse effective des véhicules est, en moyenne, de 103/107 km/h pour les véhicules légers resp. jour/nuit et de 82/92 km/h pour les poids lourds, resp. jour/nuit.

**Autoroutes** Les études réalisées en matière de vitesse de circulation en différents endroits montrent que la vitesse effective des véhicules est, en moyenne, de 119/122 km/h pour les véhicules légers resp. jour/nuit et de 94/97 km/h pour les poids lourds, resp. jour/nuit.

**Tronçons en pente** Pour des déclivités ne dépassant pas 5%, on n'observe pas de variation de la vitesse, en comparaison avec une route plate. Pour des montées avec une plus forte pente, il faut prendre en compte une diminution de vitesse et pour les descentes, une augmentation de vitesse.

### 3.3.6 Discrétisation de la route

Le calcul de propagation du son concerne un cheminement entre une source ponctuelle et un point récepteur. Aussi, la source (route), définie par un tracé polygonal, doit-elle être préalablement discrétisée, c'est-à-dire réduite à une série de points. Or, une précision élevée implique une discrétisation très fine. Ceci a pour conséquence un grand nombre de points-source et, donc, un volume important de calcul. Dans la pratique, la discrétisation doit être suffisamment fine pour que toutes les modifications importantes dans les conditions de propagation soient prises en compte. Le cas le plus critique est rencontré lorsqu'une source est masquée par un obstacle, à l'exception d'un minuscule tronçon. On choisira alors une discrétisation suffisamment fine pour que, au moins, un point corresponde au tronçon non masqué. On peut imaginer des approches permettant d'optimiser la répartition des sources sur la base de la topographie ou de l'occupation du sol. Il faut toutefois se demander si cette démarche en

8. Lärmschirme an Strassen - Akustische Quellenhöhe bei der Berechnung der Hinderniswirkung, UVEK/Bundesamt für Strassen, Forschungsauftrag 51/00, VSS, Vereinigung Schweiz. Strassenfachleute, 2001.

9. Beurteilung der effektiv gefahrenen Geschwindigkeit, Bericht Grolimund+Partner AG, Aarau (2003).



vaut la peine. On suggère dans ce cas, indépendamment de la situation, de choisir une discrétisation fixe de 5m.

## 3.4 Modèle de propagation

### 3.4.1 Préambule

Le modèle de propagation de Sonroad est formulé en termes de spectre en tiers d'octave et, pour l'essentiel, il est basé sur la norme ISO 9613-1/2<sup>10</sup>. Le modèle s'écarte toutefois de la norme pour ce qui concerne l'effet de sol (voir § 2.4). Sonroad fait appel à une solution numérique approchée pour la propagation au-dessus d'un sol plan et homogène à partir d'une source ponctuelle. Cette solution est étendue au cas d'un terrain accidenté et inhomogène à l'aide de considérations empiriques basées sur les zones de Fresnel. Le sol est caractérisé par sa résistance à l'écoulement. Une difficulté centrale consiste à identifier les chemins de propagation significatifs entre la source et le récepteur. A cet effet, on répertorie tous les parcours du son direct et des premières réflexions dans une coupe verticale du terrain. Finalement, le son direct et le son réfléchi par le sol sont additionnées en tenant compte de la phase, en considérant une perte de cohérence fonction de la distance et de la fréquence. Les réflexions sur les autres structures, telles que les écrans antibruit, sont pondérées en fonction de l'absorption à partir d'une perte par réflexion et elles sont additionnées énergétiquement pour obtenir un niveau global. Une surface réfléchissante, dont la dimension verticale est insuffisante, conduit à une réduction de niveau obtenue par une considération sur les zones de Fresnel, analogue à celle utilisée dans le cas de l'effet de sol. Enfin, on calcul le niveau global d'immission pour chacune des sources à partir des pertes sur le chemin de propagation.

### 3.4.2 Aperçu

En utilisant la terminologie de ISO 9613-2, le niveau de pression acoustique  $L_f$  en bande de tiers d'octave produit en un point récepteur par une source ponctuelle est :

$$L_f = L_{W,f} - A_f \quad (3.8)$$

avec

$L_{W,f}$	niveau de puissance acoustique dans la bande de tiers d'octave de fréquence centrale $f$ [dB]
$A_f$	atténuation due à la propagation dans la bande de tiers d'octave de fréquence centrale $f$ [dB]

L'atténuation  $A_f$  due à la propagation peut se décomposer comme suit en termes indépendants les uns des autres :

$$A_f = A_{div,f} + A_{atm,f} + A_{gr/bar/refl,f} + A_{fol,f} \quad (3.9)$$

avec

$A_{div,f}$	décroissance géométrique dans la bande de tiers d'octave de fréquence centrale $f$ [dB]
$A_{atm,f}$	atténuation dans l'air dans la bande de tiers d'octave de fréquence centrale $f$ [dB]
$A_{gr/bar/refl,f}$	effet de sol et effet d'obstacle, y compris réflexions, dans la bande de tiers d'octave de fréquence centrale $f$ [dB]
$A_{fol,f}$	atténuation supplémentaire par une végétation dense dans la bande de tiers d'octave de fréquence centrale $f$ [dB]

Certains termes de calcul comprennent la célérité du son  $c$ . D'une manière générale, on admet  $c = 340$  m/s.

### 3.4.3 Décroissance géométrique

La décroissance géométrique décrit la diminution de la pression acoustique en fonction de la distance, résultant de la répartition de l'énergie sonore sur une surface sphérique de rayon croissant. La décroissance géométrique est indépendante de la fréquence et s'exprime comme suit :

10. ISO 9613: Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors (1996).

$$A_{\text{div},f} = 20 \log \left( \frac{d}{d_0} \right) + 11 \quad [\text{dB}] \quad (3.10)$$

avec

$d$  distance source - récepteur [m]  
 $d_0$  distance de référence = 1 m

Le terme  $+ 11 \text{ dB}$  dans l'équation 3.10 résulte de la conversion du niveau de puissance acoustique en niveau de pression acoustique à 1m de distance.

### 3.4.4 Atténuation dans l'air

En se propageant dans l'atmosphère, le son perd de son intensité en raison de divers mécanismes d'absorption. Cette atténuation dans l'air  $A_{\text{atm},f}$  est fonction des conditions atmosphériques (essentiellement de la température et de l'humidité relative de l'air), de la fréquence et de la distance parcourue par les ondes sonores. Nous avons la relation :

$$A_{\text{atm},f} = \alpha_f \frac{d}{1000} \quad [\text{dB}] \quad (3.11)$$

avec

$\alpha_f$  coefficient d'absorption atmosphérique dépendant de la fréquence dans la bande de tiers d'octave de fréquence centrale  $f$  [dB/km]  
 $d$  distance source - récepteur [m]

La norme ISO 9613-1 indique le coefficient d'absorption atmosphérique  $\alpha$  en fonction de la fréquence, de l'humidité relative et de la température.

La température et le taux d'humidité moyens peuvent se déterminer à partir des relevés météo de l'Institut Suisse de Météorologie qui portent sur de nombreuses années. Les données des stations suivantes ont été exploitées : Adelboden, Altdorf, Bad Ragaz, Bâle, Berne, Buchs-Suhr, Buffalora, Château-d'Oex, La Chaux-de-Fonds, Coire, Davos, Einsiedeln, Fribourg, Genève, Glaris, Guttannen, Hallau, Kloten, Lausanne/Pully, Locarno-Monti, Lugano, Lucerne, Montreux, Neuchâtel, Oeschberg, Robbia, Samedan, Schaffhouse, Sils Maria, Sion, St.Gall, Zürich ISM. Il en résulte une température moyenne annuelle de 8°C (avec une déviation standard de 2.5°C entre stations) et une humidité relative moyenne de 76% (avec une déviation standard de 4% entre stations). La moyenne annuelle de la température resp. maximale et minimale sur une journée se monte à resp. 12.9°C et 3.5°C. Les maxima et minima d'humidité relative sur une journée sont, en moyenne, de 86% et 62%. Étant donné les écarts relativement faibles, on renonce à prendre en compte les différences systématiques entre le jour et la nuit dans le calcul de l'atténuation dans l'air. En fait, les écarts des valeurs jour/nuit par rapport aux valeurs globales - dans le cas d'une différenciation avec des bornes à 06 et 22 heures - sont plus faibles que si l'on les compare aux valeurs extrêmes.

Le tableau 3.6 le coefficient d'absorption atmosphérique s'appliquant à chaque tiers d'octave pour une température de 8°C et une humidité relative de 76%.

<b>50 Hz</b>	<b>63 Hz</b>	<b>80 Hz</b>	<b>100 Hz</b>	<b>125 Hz</b>	<b>160 Hz</b>	<b>200 Hz</b>	<b>250 Hz</b>
<b>0.1</b>	<b>0.1</b>	<b>0.2</b>	<b>0.3</b>	<b>0.4</b>	<b>0.6</b>	<b>0.8</b>	<b>1.0</b>
<b>315 Hz</b>	<b>400 Hz</b>	<b>500 Hz</b>	<b>630 Hz</b>	<b>800 Hz</b>	<b>1000 Hz</b>	<b>1250 Hz</b>	<b>1600 Hz</b>
<b>1.2</b>	<b>1.5</b>	<b>1.8</b>	<b>2.2</b>	<b>2.7</b>	<b>3.5</b>	<b>4.7</b>	<b>6.8</b>
<b>2000 Hz</b>	<b>2500 Hz</b>	<b>3150 Hz</b>	<b>4000 Hz</b>	<b>5000 Hz</b>	<b>6300 Hz</b>	<b>8000 Hz</b>	<b>10000 Hz</b>
<b>9.7</b>	<b>14.3</b>	<b>21.6</b>	<b>33.6</b>	<b>50.9</b>	<b>77.9</b>	<b>119.8</b>	<b>176.2</b>

TAB. 3.6 – coefficient d'absorption atmosphérique  $\alpha_f$  en dB/km pour une température de 8°C et une humidité relative de 76% en fonction de la fréquence centrale du tiers d'octave.

Les coefficients d'absorption figurant dans le tableau 3.6 ne s'appliquent, strictement parlant, qu'à des sons purs de la fréquence indiquée. L'utilisation de ces valeurs pour la bande de fréquence correspondante

introduit une erreur < 0.5 dB, si la condition (3.12) est respectée<sup>11</sup>.

$$\frac{d}{1000} \left( \frac{f^2}{1000^2} \right) < 6 \quad (3.12)$$

avec

$d$  distance source - récepteur  
 $f$  fréquence centrale de la bande de tiers d'octave

Par exemple, la condition (3.12) indique pour 5 kHz une distance maximum source - récepteur de 240 m. Dans la pratique, les coefficients d'absorption indiqués pour les différents tiers d'octave sont valables.

### 3.4.5 Effet de sol, effet d'obstacle et réflexions

#### Généralités

Dans pratiquement toutes les situations rencontrées, il existe, en plus du son direct entre la source et le récepteur, au moins un chemin de propagation du son lié à une réflexion au sol. Dans une topographie en pente, on rencontre souvent deux réflexions au sol. Dans le cas de faibles distances (moins de > 300 m), de petites hauteurs de source et de récepteur, de sol peu rugueux et de fréquences basses, les divers chemins sont à considérés comme cohérents, c'est-à-dire que leurs contributions peuvent être additionnées sans déphasage. Selon le déphasage, leur superposition produit un effet amplificateur ou atténuateur. StL-86 ne prenait en considération, pour l'effet de sol, qu'une atténuation plus ou moins importante et ignorait donc une possible augmentation de niveau. En outre, l'effet de sol du modèle StL-86 opérait une simplification importante d'un paramètre majeur en ne considérant qu'une hauteur moyenne sur le terrain, au lieu de prendre en compte la topographie spécifique.

Lorsqu'un des chemins sonores - soit le son direct et/ou la réflexion au sol - rencontre un obstacle, il s'ensuit une atténuation de cette contribution. Le cheminement doit alors être tracé de telle manière qu'il passe par la ou les arêtes de l'obstacle entraînant un détour minimum. L'atténuation due aux obstacles dépend essentiellement de la différence de chemin - exprimée en termes de longueur d'onde - entre le détour par l'arête de l'obstacle et le chemin direct. En présence d'obstacles, l'introduction de points descriptifs des arêtes de l'obstacle, agissant comme des sources secondaires, crée des chemins supplémentaires par le biais de réflexions au sol (Figure 3.5).

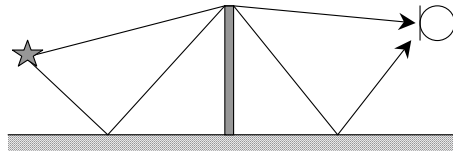


FIG. 3.5 – Un obstacle génère un chemin sonore supplémentaire par le fait que des réflexions au sol sont créées de part et d'autre de l'obstacle. Le chemin source-sol-arête-sol-récepteur est ignoré.

Des réflexions sur des structures planes, la plupart du temps verticales, peuvent générer des chemins de propagation supplémentaires. L'intensité du son réfléchi s'atténue en fonction du pouvoir absorbant de la surface réfléchissante. En principe, seules les premières réflexions sont prises en compte. La réflexion sur de telles structures est traitée ici de manière non conforme au concept usuel de la source-image (voir Figure 3.6). En simplifiant, on peut dire que des réflexions se produisent lorsque le plan de coupe vertical passant par la source et le récepteur a une intersection avec le réflecteur. Sur cette base, il est possible d'effectuer un calcul en 2D sans connaître l'azimut du réflecteur. Ainsi, peut-on, sans problème, utiliser des modèles numériques de surface modernes. L'approche proposée ici conduit, par comparaison au concept de la source-image, à une intensité du son réfléchi légèrement sous-estimée dans le cas de petits réflecteurs.

Le terme d'atténuation  $A_{gr/bar/refl,f}$  se détermine à partir de la différence entre le niveau du son direct et le niveau calculé en superposant le son direct, la ou les réflexions par le sol, ainsi que d'éventuelles autres réflexions, en tenant compte, le cas échéant, de l'effet d'obstacles.

11. ISO 9613-1, Acoustics - attenuation of sound during propagation outdoors - Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere.

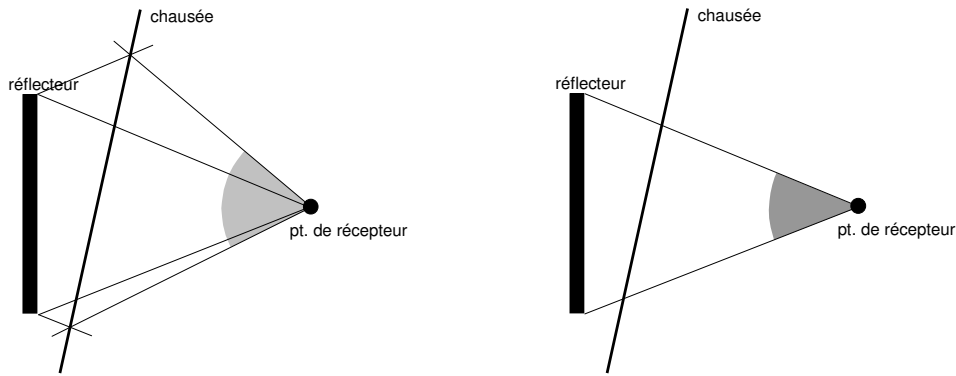


FIG. 3.6 – Traitement des réflexions: concept classique source-image (à gauche) et approche dans SonRoad (à droite). L'angle hachuré désigne l'angle d'ouverture sous lequel un supplément d'immission en provenance de la route est produit par le réflecteur.

La détermination de  $A_{gr/bar/refl,f}$  requiert tout d'abord l'identification des chemins sonores déterminants, soit de ceux correspondant à un chemin de propagation significatif. Pour chaque chemin, on détermine les éventuels effets d'obstacles selon ISO 9613-2 ( $C2 = 40$ ). En outre, pour les chemins comprenant une réflexion par le sol, on procède à une correction d'amplitude et de phase sur la base des coefficients de réflexion des ondes sphériques, en calculant une atténuation du son réfléchi au moyen d'une considération sur les zones de Fresnel (voir annexe H) dans les cas où la surface du sol est restreinte. On ne prend pas en considération la phase des réflexions ne se produisant pas au sol. L'amplitude est atténuée en fonction de l'absorption de la surface réfléchissante. Lorsque la dimension du réflecteur est trop petite, on calcule, comme dans le cas de la réflexion par le sol, une atténuation supplémentaire à l'aide d'une considération sur les zones de Fresnel.

Pour terminer, on additionne les contributions de tous les chemins au point récepteur, en tenant compte du temps de propagation, et on compare le résultat avec le son direct. Ce procédé présente la particularité d'être continu - sauf pour l'effet d'obstacle lors du passage dans la zone d'ombre géométrique - c'est à dire qu'une variation arbitrairement petite des paramètres géométriques se traduit par une modification arbitrairement petite du résultat.

### Identification des chemins sonores déterminants

La détection automatique de tous les chemins sonores déterminants entre la source et le récepteur constitue la pierre angulaire de tout le modèle de calcul. On suppose que le terrain, y compris les réflecteurs et les obstacles éventuels, est représenté en coupe par un tracé polygonal constitué de segments rectilignes. Chaque segment est soit un segment de sol, soit un segment de réflecteur. Les caractéristiques acoustiques d'un segment de sol sont données par la résistance à l'écoulement. Celles d'un segment de réflecteur correspondent à une perte par réflexion relativement à la réflexion totale sur une surface dure. L'annexe C décrit une approche possible pour la recherche des chemins. A titre d'exemple, la figure 3.7 montre une coupe à travers le terrain avec tous les chemins sonores déterminants.

### Calculs de propagation pour les différents chemins sonores

Suite à l'identification des chemins sonores, on détermine l'amplitude et la phase de la pression acoustique au point récepteur, en normalisant l'intensité de la source de manière arbitraire à une pression sonore de 1 Pa à 1 m de distance. La pression acoustique au point récepteur - sans tenir compte d'éventuels effets d'obstacle -  $\underline{p}_{dir,ref}(f)$  sert de référence (pour ce qui concerne la représentation complexe de grandeurs sinusoïdales, voir l'annexe D).

$$\underline{p}_{dir,ref}(f) = \frac{1}{r} e^{jkr} \quad (3.13)$$

avec

$r$  distance source - récepteur traversant d'éventuels obstacles [m]  
 $k$  nombre d'onde =  $\frac{2\pi}{\lambda}$  [1/m]

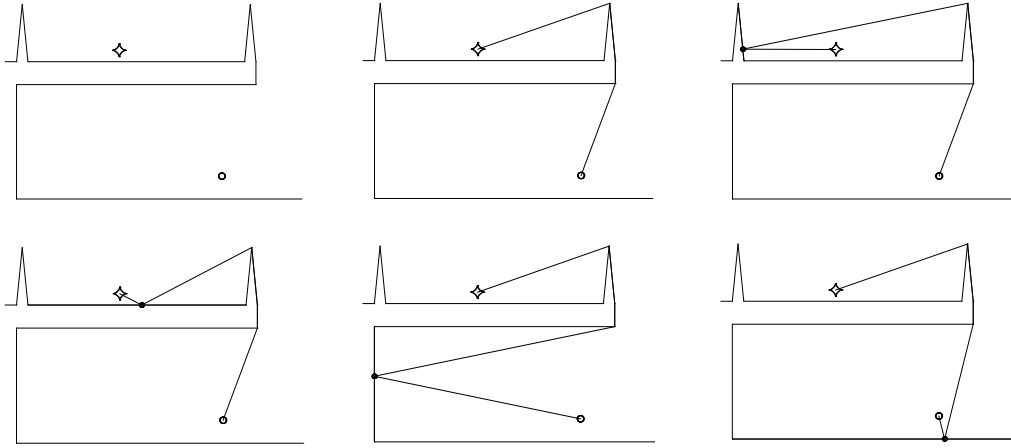


FIG. 3.7 – Exemple de coupe dans le terrain (galerie avec route en hauteur avec point récepteur situé en dessous) avec tous les chemins sonores significatifs. L'étoile désigne la source, le point désigne le récepteur.

$\lambda$	longueur d'onde = $\frac{c}{f}$ [m]
$c$	célérité du son = 340 [m/s]
$f$	fréquence [Hz]
$j$	unité imaginaire, $j^2 \equiv -1$

Le son direct  $\underline{p}_{\text{dir}}(f)$  doit prendre en compte un effet d'obstacle éventuel et prend la forme

$$\underline{p}_{\text{dir}}(f) = 10^{-0.05D_z(f)} \frac{1}{r} e^{jk_r r'} \quad (3.14)$$

avec

$D_z(f)$	effet d'obstacle éventuel en fonction de la fréquence $f$ , selon éq. 3.15 [dB]
$r$	distance source - récepteur traversant d'éventuels obstacles [m]
$r'$	distance source - récepteur contournant d'éventuels obstacles [m]

On utilise, pour l'effet d'obstacle  $D_z(f)$  la relation de la norme ISO 9613-2 s'appliquant à la prise en compte séparée de la réflexion de sources-images par le sol ( $C_2=40$ ) (3.15).

$$D_z(f) = 10 \log \left( 3 + \frac{40}{\lambda} C_3 z K_{\text{met}} \right) \geq 0 \quad (3.15)$$

avec

$C_3$	Resp. = 1 pour la diffraction sur un obstacle simple, = $\frac{1 + (\frac{5\lambda}{c})^2}{\frac{1}{3} + (\frac{5\lambda}{c})^2}$ pour la diffraction sur un obstacle double
$\lambda$	Longueur d'onde [m]
$z$	Différence de chemin autour de l'obstacle et à travers l'obstacle [m]. Les obstacles négatifs, qui ne coupent juste pas la ligne de visée, sont ignorés. Cela provoque une discontinuité à la limite de l'ombre. La variation de niveau observable juste en dehors de la limite de l'ombre est si abrupte qu'il apparaît justifié de l'assimiler à un bond.
$e$	Dans le cas de diffraction double / multiple : distance entre la première et la dernière arête d'obstacle significatives [m].
$K_{\text{met}}$	Terme correctif prenant en compte la réduction de l'effet d'obstacle dans le cas d'une propagation incurvée vers le sol. Pour ce type de propagation, $K_{\text{met}} = e^{-\left(\frac{1}{2000}\right) \sqrt{\frac{d_{ss} d_{sr} d}{2z}}}$ , pour une propagation dans des conditions normales, $K_{\text{met}} = 1.0$ .
$d_{ss}$	Distance source - première arête [m]
$d_{sr}$	Distance seconde arête - récepteur [m]
$d$	Distance source - récepteur [m]

L'effet d'obstacle  $D_z(f)$  est limité à 20 dB.

Le calcul des chemins sonores incluant une réflexion par le sol s'effectue en utilisant une source-image et des chemins-image. En plus d'un éventuel effet d'obstacle, on tiendra compte des coefficients de réflexion de l'onde sphérique  $Q(f)$  sur le sol, dépendant de la fréquence, ainsi que, le cas échéant, d'une atténuation résultant d'une aire restreinte de l'élément réfléchissant. Le coefficient de réflexion de l'onde sphérique  $Q(f)$  se détermine à partir de la solution applicable au cas d'une source ponctuelle au-dessus d'un sol homogène<sup>12</sup>. Le point-source est constitué par le sommet du cheminement polygonal précédent le point de réflexion et le point récepteur est le sommet suivant le point de réflexion. On part de l'hypothèse d'un sol à réaction localisée, c'est-à-dire que la condition aux limites " rapport entre la pression acoustique et composante verticale de la vitesse du son égal à l'impédance du sol " est respectée. Le calcul fait appel aux grandeurs suivantes (voir également la figure 3.8):

$d$	distance horizontale source - récepteur [m]
$h_s$	hauteur de la source sur le sol [m]
$h_r$	hauteur du récepteur sur le sol [m]
$Z(f)$	impédance du sol normalisée à $\rho c$
$R_1$	distance source - récepteur [m]
$R_2$	distance source - point de réflexion - récepteur [m]
$\lambda$	longueur d'onde [m]
$k$	nombre d'onde = $\frac{2\pi}{\lambda}$ [1/m]

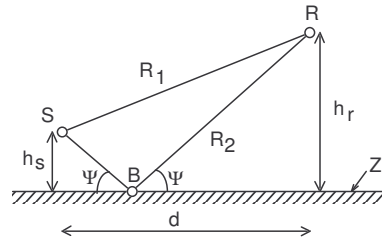


FIG. 3.8 – Vue schématique de la propagation sonore à partir d'une source ponctuelle sur un sol homogène d'impédance  $Z(f)$ , avec une source  $S$ , un point de réflexion  $B$  et un récepteur  $R$ .

Le coefficient de réflexion de l'onde sphérique  $Q(f)$  se déduit du coefficient de réflexion  $r_p(f)$  de l'onde stationnaire selon éq. 3.16. On remarquera que les variables complexes contiennent une information d'amplitude et une information de phase.

$$Q(f) = r_p(f) + (1 - r_p(f))F(w) \quad (3.16)$$

mit

$$r_p(f) = \frac{\sin(\psi) - \frac{1}{Z(f)}}{\sin(\psi) + \frac{1}{Z(f)}}$$

$$w = \frac{1+j}{2} \sqrt{kR_2} \left( \sin(\psi) + \frac{1}{Z(f)} \right)$$

Le facteur  $F(w)$  dans l'équation 3.16 peut, dans le cas d'une propagation rasante, soit  $d \gg h_s + h_r$ , prendre la valeur approchée<sup>13</sup>.

$$F(w) \approx 1 + j\sqrt{\pi}we^{-w^2} \operatorname{erfc}(-jw) = 1 + j\sqrt{\pi}w \operatorname{wofz}(w) \quad (3.17)$$

Dans l'éq. 3.17  $\operatorname{erfc}(-jw)$  désigne la fonction d'erreur complexe<sup>14</sup>. On dispose d'un algorithme très efficace pour l'évaluation numérique de la fonction  $\operatorname{wofz}(w) = e^{-w^2} \operatorname{erfc}(-jw)$ <sup>15, 16</sup> (voir annexe E).

12. C. I. Chessel, Propagation of noise along a finite impedance boundary. J. Acoustical Society of America, 62, p.825-834 (1977).

13. C. F. Chien, W. W. Soroka, A note on the calculation of sound propagation along an impedance surface. J. Sound and Vib. vol. 69, 340-343 (1980).

14. M. Abramowitz, J. A. Stegun, Handbook of Mathematical Functions.

15. W. Gautschi, Efficient Computation of the Complex Error Function. SIAM J. Numer. Anal. vol. 7, 187-198 (1970).

16. Collected Algorithms from CACM. Algorithm 363.

L'impédance du sol est fonction de la fréquence. Pour caractériser un sol par une valeur unique, on utilise généralement la résistance à l'écoulement  $\sigma$  (sigma). En faisant appel au modèle empirique de Delany et Bazley<sup>17</sup> (3.18) on peut déterminer une impédance normalisée à  $\rho c$  pour chaque fréquence. Il faut noter que le signe négatif de la partie imaginaire de l'impédance dans l'éq. 3.18 dépend de la convention de signe pour la dépendance temporelle dans la représentation complexe. Ici, on pose le terme oscillatoire égal à  $e^{-j\omega t}$ <sup>18</sup>.

$$Z(f) = 1.0 + 9.08 \left(\frac{f}{\sigma}\right)^{-0.75} + j11.9 \left(\frac{f}{\sigma}\right)^{-0.73} \quad (3.18)$$

avec

$Z(f)$  impédance normalisée à  $\rho c$   
 $f$  fréquence [Hz]  
 $\sigma$  résistance à l'écoulement [Rayl]

Le tableau 3.7 indique la résistance à l'écoulement de différents types de sol.

Type de sol	résistance à l'écoulement $\sigma$ [Rayl]
bitume, eau	20'000
terrain dur	5'000
terrain mou, gravier	500
gazon	300
pâturage	150
neige tassée	40
neige poudreuse	10

TAB. 3.7 – résistance à l'écoulement de divers types de sol.

On admet ici que la réflexion au sol touche une aire correspondant à une zone de Fresnel de  $\lambda/4$  (voir Annexe H). Cette aire se compose de chacun des points du sol pour lesquels la somme des distances source- sol et sol-récepteur est, dépasse de, au maximum,  $\lambda/4$  la somme des distances source-point de réflexion et point de réflexion- récepteur. En l'absence d'une telle aire, l'intensité du son réfléchi se réduit en conséquence, la proportionnalité entre pression acoustique et surface étant maintenue<sup>19, 20</sup>. Étant donné que l'on ne travaille qu'en coupe, l'étude de la zone de Fresnel se réduit à un tronçon. Cette simplification revient à approximer une zone de Fresnel elliptique par un rectangle. On détermine le facteur de zone de Fresnel dépendant de la fréquence, s'appliquant à une réflexion sur un segment de sol, à l'aide de l'éq. 3.19.

$$\Phi(f) = \frac{l_s(f)}{l_F(f)} \quad (3.19)$$

avec

$l_F(f)$  longueur de la zone de Fresnel  $\lambda/4$   
 $l_s(f)$  longueur du tronçon de segment situé à l'intérieur de la zone de Fresnel  $\lambda/4$

La longueur de la zone de Fresnel  $\lambda/4$  peut se déterminer en construisant l'intersection d'une ellipse avec la droite du segment. Les foyers de l'ellipse correspondent respectivement aux points source et récepteur ou aux points angulaires du chemin situés immédiatement avant et après le point de réflexion. L'ellipse décrit le lieu géométrique tel que la somme des distances au premier et au second point focal est constante. On pose alors la somme des distances comme étant supérieure de  $\lambda/4$  à la somme des distances du point de réflexion resp. à la source et au récepteur. L'aire contribuant à la réflexion s'étend, d'une part à l'intérieur de l'ellipse, et, d'autre part, sur la droite du segment. La distance entre les deux points d'intersection correspond à la longueur d'une zone de Fresnel  $\lambda/4$ .

17. M. E. Delany, E. N. Bazley, Acoustical properties of fibrous absorbent materials. Applied Acoustics vol. 3, 105-116 (1970).

18. G. A. Daigle et al. Some comments on the literature of propagation near boundaries of finite acoustical impedance, Journal of the Acoustical Society of America, vol. 66, p.918-919 (1979).

19. D. C. Hothersall, J. B. N. Harriott, Approximate models for sound propagation above multi-impedance plane boundaries, J. Acoustical Society of America, vol. 97, p.918-926 (1995).

20. DELTA, Danish Electronics, Light & Acoustics, Nord2000: Comprehensive Outdoor Sound Propagation Model, 2001.

On admet que les deux foyers de l'ellipse s'expriment par  $F_1 = (xF_1, zF_1)$  et  $F_2 = (xF_2, zF_2)$ , et le point de réflexion par  $R = (xR, zR)$ . Ainsi, les relations suivantes s'appliquent aux demi-axes de l'ellipse  $a, b$  et à l'excentricité linéaire  $c$ :

$$a = \frac{1}{2} \left( \sqrt{(xF_1 - xR)^2 + (zF_1 - zR)^2} + \sqrt{(xF_2 - xR)^2 + (zF_2 - zR)^2} + \frac{\lambda}{4} \right) \quad (3.20)$$

$$c = \frac{1}{2} \sqrt{(xF_1 - xF_2)^2 + (zF_1 - zF_2)^2} \quad (3.21)$$

$$b = \sqrt{a^2 - c^2} \quad (3.22)$$

Le calcul de l'intersection de l'ellipse avec la droite du segment se trouve simplifiée par le fait que, en procédant à deux transformations de coordonnées, on fasse correspondre le centre de l'ellipse à l'origine du système de coordonnées et on opère une rotation de l'ellipse de manière à ce que son grand axe coïncide avec l'axe  $x$ .

A titre d'exemple, la figure 3.9 montre l'ellipse de la zone de Fresnel construite pour une réflexion au sol.

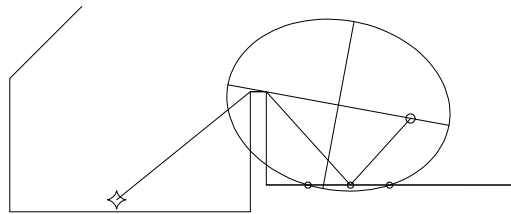


FIG. 3.9 – Exemple de propagation d'une réflexion par le sol avec l'ellipse de la zone de Fresnel. Les points d'intersection marqués avec le segment de sol indiquent le tronçon contribuant à la réflexion. La taille de l'ellipse est fonction de la fréquence.

Enfin, on obtient la représentation complexe de la pression acoustique au point récepteur produite par un rayon réfléchi par le sol :

$$\underline{p}_{\text{gr}}(f) = 10^{-0.05D_z(f)} \frac{Q(f)\Phi(f)}{r} e^{jkr'} \quad (3.23)$$

avec

$D_z(f)$	effet d'obstacle éventuel sur le chemin réfléchi [dB]
$Q(f)$	coefficient de réflexion de l'onde sphérique
$\Phi(f)$	facteur de zone de Fresnel
$r$	longueur du chemin virtuel traversant d'éventuels obstacles [m]
$r'$	longueur du chemin virtuel contournant d'éventuels obstacles [m]

Les réflexions se produisant sur des structures autres que le sol sont traitées de manière analogue au cas des réflexions par le sol, moyennant la substitution des coefficients de réflexions des ondes sphériques par une éventuelle perte par réflexion. La perte par réflexion est une mesure de l'absorption du réflecteur. Dans le cas de parois très absorbantes - et en l'absence de données précises - on peut admettre une perte par réflexion de 8 dB(A).

$$\underline{p}_{\text{refl}}(f) = 10^{-0.05D_z(f)} 10^{-0.05\Delta R(f)} \frac{\Phi(f)}{r} e^{jkr'} \quad (3.24)$$

mit

$D_z(f)$	effet d'obstacle éventuel pour le chemin virtuel [dB]
$\Delta R(f)$	perte par réflexion (0...10 dB)
$\Phi(f)$	facteur de la zone de Fresnel
$r$	longueur du chemin virtuel traversant d'éventuels obstacles [m]
$r'$	longueur du chemin virtuel contournant d'éventuels obstacles [m]



La contribution des divers chemins sonores se calcule alors à l'aide de l'éq. 3.25 établissant le terme  $A_{gr/bar/refl}(f)$  qui prend en compte l'effet de sol, l'effet d'obstacle, ainsi que les réflexions, la sommation s'étendant à tous les chemins valables.

$$A_{gr/bar/refl}(f) = 10 \log \left( \frac{|p_{dir,ref}(f)|^2}{K^2 \left| p_{dir}(f) + \sum_{i'} p_{gr}(f) \right|^2 + (1 - K^2) \left( |p_{dir}(f)|^2 + \sum_{i'} |p_{gr}(f)|^2 \right) + \sum_{i''} |p_{refl}(f)|^2} \right) \quad (3.25)$$

avec

$p_{dir,ref}(f)$	pression acoustique de référence, selon éq. 3.13
$p_{dir}(f)$	valeur efficace de la pression du son direct, selon 3.14
$p_{gr}(f)$	pression acoustique au point récepteur pour un chemin réfléchi par le sol, selon éq. 3.23.
$p_{refl}(f)$	pression acoustique au point récepteur pour un chemin réfléchi par un autre objet, selon éq. 3.24.
$K$	facteur de cohérence, selon éq. 3.26
$ \dots $	module des grandeurs complexe
$\sum_{i'}$	sommation sur tous les chemins valables de réflexion par le sol
$\sum_{i''}$	sommation sur tous les chemins valables de réflexion par d'autres objets

En principe, dans l'éq. 3.25, le son direct et les réflexions par le sol sont additionnés en tenant compte de la phase, tandis que les contributions d'autres réflexions sont additionnées énergétiquement. Ce n'est que dans le cas de faibles distances, de faibles différences de chemin et de basses fréquences qu'une sommation sensible à la phase est appliquée. Des inhomogénéités de l'air, de même que des aspérités du terrain réduisent la cohérence entre les différentes contributions. Cet effet est pris en compte par l'introduction du facteur de cohérence  $K$ . Un facteur  $K = 0$  désigne une cohérence très faible, d'où addition énergétique des contributions. Un facteur  $K = 1$  désigne une cohérence totale, d'où addition sensible à la phase. L'estimation de  $K$  est délicate et entachée d'une incertitude importante. Il est à supposer que  $K$  dépende de la longueur du chemin sonore, de la séparation locale entre son direct et son réfléchi, de la nature du terrain, de la fréquence et de la situation atmosphérique (stratification thermique, importance de la convection, vent, ...). Pour simplifier,  $K$  se détermine à l'aide de l'éq. 3.26. Dans cette équation, la dépendance de la fréquence n'est pas linéaire, mais quadratique, étant donné que la cohérence dépend de la fréquence de deux manières. On part de l'idée que la dispersion des durées de propagation est de dépendance à la fois temporelle et spatiale. D'une part, la dispersion des chemins de propagation doit se mesurer en longueurs d'onde, s'agissant de son effet sur la phase. D'autre part, la pression acoustique résultant d'un chemin de propagation est obtenue par une intégration sur un volume limité. Il en résulte un certain nivellement des effets de dispersion des durées de propagation. Le degré de nivellement peut s'apprécier par une considération faisant appel aux zones de Fresnel, l'aire de la première zone étant essentiellement proportionnelle à la longueur d'onde. L'influence de la séparation locale entre son direct et son réfléchi par le sol n'est pas prise en compte.

$$K = e^{-(\gamma_0 + \gamma f^2 r'_{dir})} \quad (3.26)$$

avec

$\gamma_0$	paramètre empirique = $9.0 \times 10^{-3}$ , voir annexe F
$\gamma$	paramètre empirique = $4.5 \times 10^{-11} [s^2/m]$ , voir annexe F
$f$	fréquence [Hz]
$r'_{dir}$	longueur du chemin du son direct contournant d'éventuels obstacles [m]

L'effet de sol et l'effet d'obstacle dépendent fortement de la fréquence. Un terme  $A_{gr/bar/refl,j}$  s'appliquant à un tiers d'octave ne peut se déterminer à partir d'une seule fréquence, mais doit être obtenu par intégration sur toute la bande de tiers d'octave. Pour la plage de 50 à 10'000 Hz, on utilise les fréquences de référence suivantes :

$$f_i = 44.76510929 \times 2^{\frac{i}{27}} \quad [\text{Hz}] \quad (3.27)$$

$i$  prenant les valeurs 0,1,2,...,215. La valeur  $A_{gr/bar/refl,j}$  pour un tiers d'octave se calcule en faisant la somme énergétique des termes correspondant aux 9 fréquences de la bande considérée:

$$A_{gr/bar/refl,j} = -10 \log \left( \frac{1}{9} \sum_{i=9j}^{9j+8} 10^{-0.1A_{gr/bar/refl}(f_i)} \right) \quad (3.28)$$

$j$  correspondant au numéro du tiers d'octave et prenant les valeurs 0,1,2,...,23. La fréquence du tiers d'octave correspondant à  $j$  est  $f_j = 44.76510929 \times 2^{\frac{9j+4}{27}}$  Hz.

### 3.5 Effets d'atténuation supplémentaires

En conformité avec ISO 9613-2, on considère, le cas échéant, comme effet d'atténuation supplémentaire  $A_{fol}$  l'atténuation résultant du passage du son à travers une végétation dense (arbres et buissons). A cet effet, on détermine le chemin parcouru à travers la végétation  $d_f$  en admettant une propagation incurvée vers le sol, correspondant à une trajectoire circulaire de rayon égal à 5 km. Pour  $d_f < 10$  m on a  $A_{fol} = 0$ . Pour  $d_f > 10$  m on utilise les atténuations du tableau 3.8. Pour un tiers d'octave, on utilise la valeur de la bande d'octave correspondante.

$d_f$	63	125	250	500	1k	2k	4k
10...20m	0dB	0dB	1dB	1dB	1dB	1dB	2dB
20...200m	0.02dB/m	0.03dB/m	0.04dB/m	0.05dB/m	0.06dB/m	0.08dB/m	0.09dB/m
> 200m	4 dB	6 dB	8 dB	10 dB	12 dB	16 dB	18 dB

TAB. 3.8 – Atténuation par la végétation  $A_{fol}$  en fonction de la fréquence (par bandes d'octave).

### 3.6 Calcul du niveau d'immission pondéré A

La dernière étape consiste à calculer le niveau global d'immission à partir de tous les résultats partiels déterminés précédemment. On part des hypothèses suivantes :

- La situation s'exprime en termes de  $l$  tronçons significatifs de sources linéaires présentant chacun une quantité de trafic constant et une vitesse constante.
- Chaque tronçon significatif a été découpé en  $n(i)$  sources ponctuelles. Chaque source ponctuelle représente un segment  $\Delta s(i,k)$  (avec  $k$ : numéro d'ordre de la source ponctuelle sur le tronçon  $i$  et présente, dans le tiers d'octave n°  $j$  une atténuation due à la propagation vers le récepteur égale à  $A_j(i,k)$ .

Il en résulte, au point d'immission, un niveau moyen  $L_{eq,frei,A}$  :

$$L_{eq,frei,A} = 10 \log \left( \sum_{j=0}^{23} \sum_{i=1}^l \sum_{k=1}^{n(i)} \left( \frac{M_{PW}(i)}{3600} \frac{3.6 \Delta s(i,k)}{v_{PW}(i)} 10^{0.1(L_{W,A,PW}(i)+T_j-A_j(i,k))} + \frac{M_{LKW}(i)}{3600} \frac{3.6 \Delta s(i,k)}{v_{LKW}(i)} 10^{0.1(L_{W,A,LKW}(i)+T_j-A_j(i,k))} \right) \right) \quad (3.29)$$

avec

- $l$  nombre de tronçons de sources linéaires
- $n(i)$  nombre de sources ponctuelles pour le tronçon n°  $i$
- $M_{PW}(i)$  nombre de véhicules légers par heure sur le tronçon n°  $i$  [1/h]
- $M_{LKW}(i)$  nombre de poids-lourds par heure sur le tronçon n°  $i$  [1/h]
- $v_{PW}(i)$  vitesse des véhicules légers sur le tronçon n°  $i$  [km/h]
- $v_{LKW}(i)$  vitesse des poids-lourds sur le tronçon n°  $i$  [km/h]
- $L_{W,A,PW}(i)$  niveau de puissance acoustique d'un véhicule léger circulant sur le tronçon n°  $i$ , selon éq. 3.3 [dB(A)]
- $L_{W,A,LKW}(i)$  niveau de puissance acoustique d'un poids-lourd circulant sur le tronçon n°  $i$ , selon éq. 3.4 [dB(A)]
- $T_j$  différence de niveau du bruit du trafic routier : niveau global pondéré A moins niveau

$\Delta s(i,k)$	dans le tiers d'octave n° $j$ , pondéré A, selon tableau 3.5 [dB].
$A_j(i,k)$	longueur du segment représenté par la source n° $k$ sur le tronçon n° $i$ [m] atténuation due à la propagation vers le point récepteur pour la source ponctuelle n° $k$ , sur le tronçon n° $i$ et dans la bande de tiers d'octave n° $j$ [dB]

### 3.7 Détermination du niveau d'évaluation

L'évaluation selon l'OPB<sup>21</sup> considère un point d'immission situé au milieu d'une fenêtre ouverte. Le niveau d'immission pondéré A résultant de l'éq. 3.29 s'applique en fait à un point récepteur en champ libre. Le calcul du niveau d'immission à la fenêtre ouverte à partir du niveau en champ libre s'effectue au moyen de l'éq. 3.30<sup>22</sup>. Il faut remarquer que cette correction n'était pas incluse dans STL-86.

$$L_{eq,m} = L_{eq,frei,A} + 1 \quad [dB(A)] \quad (3.30)$$

avec

$L_{eq,m}$	niveau d'immission pondéré A à la fenêtre ouverte [dB(A)]
$L_{eq,frei,A}$	niveau d'immission pondéré A en champ libre [dB(A)]

Le niveau d'évaluation  $L_r$  se détermine séparément pour le jour (6-22 heures) et pour la nuit (22-6 heures). Un terme correctif  $K1$ , tenant compte du trafic moyen resp., diurne et nocturne, est ajouté au niveau d'immission pondéré A à la fenêtre ouverte.

$$L_r = L_{eq,m} + K1 \quad (3.31)$$

avec

$L_r$	niveau d'évaluation [dB]
$L_{eq,m}$	niveau d'immission pondéré A à la fenêtre ouverte [dB(A)]
$K1$	terme correctif selon éq. 3.32.

$$K1 = \begin{cases} -5 & : N < 31.6 \\ 10 \log\left(\frac{N}{100}\right) & : 31.6 \leq N \leq 100 \\ 0 & : N > 100 \end{cases} \quad (3.32)$$

avec

$N$	trafic motorisé resp. diurne et nocturne sur le tronçon routier dont la contribution au niveau d'immission est prépondérante.
-----	---

### 3.8 Conseils d'utilisation

**Mesurage de contrôle** Ce modèle de calcul correspond à l'état actuel de la technique. On peut en attendre des résultats fiables, dans le cadre des conditions aux limites spécifiées. Il est toutefois recommandé de procéder, dans la mesure du possible, à des vérifications par échantillonnage de l'exactitude des calculs en effectuant des mesurages. On choisira alors des situations aussi représentatives que possible, prenant en compte des éléments géométriques influençant de manière déterminante la propagation, tels que, p. ex. des écrans antibruit.

**Sources de bruit spécifiques** Les formules d'émission utilisées dans le modèle sont basées sur un trafic moyen composite, résultant de nombreux recensements individuels. Dans les cas où la composition des véhicules impliqués est particulière (p. ex. tronçon comprenant de nombreux camions pour le transport de gravier) ou en présence d'un revêtement de route particulier, il peut être indiqué d'adapter la formule d'émission en se basant sur des mesurages de niveau sonore maximum de passage. On appliquera à cet effet la méthode indiquée au paragraphe 3.3.1.

21. OPB, Ordonnance fédérale sur la Protection contre le Bruit, Etat 3 juillet 2001.

22. Méthode pour la détermination des valeurs extérieures des immissions avec des fenêtres fermées. Informations concernant l'Ordonnance sur la Protection contre le Bruit (OPB) No. 7, Office fédéral de l'Environnement, de la Forêt et du Paysage (OFEFP) (1995).

**Catégories de véhicules** La classification des véhicules en deux catégories est conforme à l'OPB. La catégorie Véhicules Légers comprend les voitures de tourisme, les voitures de livraison, les minibus, les cyclomoteurs et les trolleybus. La catégorie Poids-Lourds comprend les camions, les semi-remorques, les autocars et autobus, les motocycles et les tracteurs.

**Écoulement non stationnaire du trafic, carrefours, giratoires, courbes serrées etc.** SonRoad présuppose un écoulement stationnaire du trafic, soit une vitesse constante des véhicules. En l'absence de données particulières, on recommande, d'introduire, pour les carrefours, feux de signalisation, giratoires, courbes serrées, etc., la vitesse correspondant à un trafic fluide. L'expérience montre que, souvent, l'augmentation des émissions provenant des phases d'accélération est compensée par des émissions réduites durant les arrêts ou les mouvements à faible vitesse.

**Découpage des voies de circulation** La définition de la source est de la responsabilité de l'utilisateur. On peut, dans le cas le plus simple, considérer une route comme une source linéaire unique, située au milieu de la route. Cependant, lorsque des points récepteurs ou des éléments déterminants pour la propagation du son, tels que des écrans antibruit, sont situés à proximité de la route, il est recommandé de découper la source de manière plus précise. Il est alors recommandé de modéliser séparément les différentes voies de circulation.

**Parkings** Le présent modèle ne permet pas de calculer les immissions en provenance des parkings. Une norme suisse sur les émissions sonores des parkings est actuellement en travail dans le cadre d'un projet de recherche supporté par la VSS.

**Réflexions** SonRoad considère automatiquement des réflexions de premier ordre sur des structures verticales, pour autant qu'elles apparaissent sur le plan de coupe vertical passant par le point source et le point récepteur. Dans des cas particuliers, il peut s'avérer nécessaire d'ajouter des sources virtuelles.

**Réflexions multiples entre écrans et façades** Dans le cas d'écran antibruit situés parallèlement à la façade d'un immeuble, une amplification du bruit au niveau de la façade peut se produire du fait des réflexions entre l'arrière de la paroi et la façade. Cette réduction apparente de l'effet d'écran peut atteindre quelque 4 dB et elle est d'autant plus importante que le point d'immission se trouve plus bas dans la zone d'ombre<sup>23</sup>. Cet effet doit être calculé manuellement.

**Corridors routiers** Dans les corridors routiers, c'est à dire le long des tronçons entre deux rangées de bâtiments, une amplification de bruit se produit à cause des réflexions multiples. Souvent, ces réflexions sont diffuses à cause de la forte structuration des façades par des éléments tels que balcons, etc. Le présent modèle ne traite que des réflexions du premier ordre. Dans ce genre de situation, il est recommandé d'utiliser la méthodologie décrite dans la Communication N° 6 (1995) relative à l'OPB, publiée par l'Office Fédéral de l'Environnement, de la Forêt et du Paysage, qui permet d'estimer l'augmentation du niveau de bruit le long d'une route droite, avec une densité de construction plus ou moins grande.

**Portails de tunnel** SonRoad n'offre aucun procédé spécifique pour calculer le rayonnement du bruit par les portails de tunnel. On se référera aux publications en la matière de l'EMPA et de Balzari et Schudel<sup>24</sup>.

**Ouvrages de protection phonique particuliers** Pour ce qui concerne les ouvrages particuliers, tels que galeries, constructions abritant des installations de ventilations, etc., il y a lieu d'utiliser des méthodes de détermination spécifiques, p. ex. à l'aide de maquettes à l'échelle<sup>25</sup> ou par des procédés de calcul basés sur la théorie ondulatoire.

**Réflexions par la forêt** Des réflexions diffuses sont produites en lisière de forêt. Ce type de réflexion ne peut pas être traité directement par le modèle SonRoad. L'expérience montre que la perte par réflexion par rapport à un miroir idéal est de l'ordre de 15 dB(A).

**Diffraction sur des arêtes verticales** SonRoad ne tient pas compte de la diffraction sur des arêtes verticales. Dans des situations particulières, une erreur peut se produire lorsqu'on ne calcule pas la moyenne lors d'un passage comprenant un angle d'ouverture important.

**Effet d'obstacle de digues antibruit végétalisées** En général, la présence de végétation sur une digue diminue légèrement l'effet d'obstacle de par l'effet diffusant produit par la végétation. D'autre

---

23. Kurt Heutschi, Parameter study of the insertion loss reduction in case of a building facade parallel to a noise barrier, *Acta Acustica*, vol. 89 (2003).

24. Die Lärmabstrahlung von Strassentunnel-Portalen, Bundesamt für Strassenbau, Forschungsaufträge 25/77 und 16/82, (1983).

25. Kurt Eggenschwiler, Kurt Heutschi, Nicole Lüthi-Freuler, Optimaler Lärmschutz dank akustischer Modellmessung, *tec21*, Heft 7 (2001).

part, la végétation influence la circulation de l'air autour de l'obstacle, de sorte que, par vent portant, l'effet d'obstacle est plus important avec que sans végétation<sup>26</sup>.

**Écrans antibruit avec couronnement spécial** Il s'agit de dispositifs disponibles sur le marché qui peuvent être installés sur le sommet d'un écran antibruit pour lui donner une forme particulière. Ils sont censés augmenter de manière significative l'effet de l'écran dans une proportion plus importante que ce qui peut être attendu d'une simple augmentation de la hauteur de l'ouvrage. Les résultats d'investigations publiés jusqu'à ce jour font état d'une légère amélioration qui dépend de la fréquence (ordre de grandeur 1 dB), cet effet étant, en l'état, considéré comme trop modeste pour justifier leur utilisation.

**Obstacles particuliers** L'effet d'obstacle de structures croissant de haut en bas n'est pas pris en compte dans SonRoad.

**Influence des conditions météo** SonRoad considère, pour l'essentiel, des conditions de propagation neutres, c'est à dire une atmosphère homogène. Dans le cas des obstacles, la possibilité existe de prendre en compte un effet d'obstacle diminué pour simuler l'influence de couches d'inversion ou de situations de vent portant. Étant donné que, en particulier de nuit, on doit admettre l'hypothèse d'une propagation sonore progressive, il est conseillé simplement d'utiliser un effet d'obstacle réduit pour le calcul du niveau d'évaluation en période nocturne. Il faut noter que le procédé décrit dans ISO 9613-2 pour effectuer la correction météo ne peut pas être appliqué, par le fait que SonRoad fait appel à un calcul différent pour l'effet de sol.

**Portée utile du modèle** Le modèle SonRoad ignorant la plupart du temps l'influence des facteurs météo sur la propagation sonore, il s'ensuit des résultats entachés d'une erreur augmentant avec la distance. En particulier, il ne prend pas en compte le phénomène d'ombre acoustique apparaissant dans des conditions de propagation défavorables, telles que vent contraire et/ou stratification thermique instable (température décroissant lorsque l'altitude augmente). Un point récepteur situé dans la zone d'ombre ne reçoit, selon l'acoustique géométrique (ray tracing), aucune énergie sonore en provenance de la source. En réalité, le niveau sonore ne disparaît pas complètement, l'atténuation étant cependant considérable. Des simulations utilisant la technique des rayons montrent que, en terrain plat et dans des conditions de stratification thermique telles qu'observables normalement en période diurne, une ombre acoustique se produit à partir de 10 m de hauteur et à une distance de la source d'approximativement 250 m. Des résultats analogues sont observés en présence d'un vent contraire modéré de 2 m/s. La fiabilité du modèle SonRoad diminue pour des distances dépassant 200 m. Un projet de recherche pour le calcul du bruit du trafic routier produit à grande distance est actuellement en développement sous l'égide de l'OFROU, qui doit fournir des résultats plus précis à grande distance, moyennant des calculs plus importants.

**Ponts** Les ponts ont eu influence particulière sur les immissions de bruit. D'une part, leur position élevée peut annuler l'effet de sol et l'effet d'obstacles éventuel. Cet effet est pris en compte de manière correcte par le modèle à condition que la topographie soit introduite correctement. D'autre part, des bruits impulsifs peuvent se produire au franchissement des joints. Or il n'est pas possible de fournir des indications générales concernant ce type de bruit.

**Modélisation du sol avec un revêtement drainant** Dans l'état actuel des connaissances, la propagation du son en présence de revêtement drainants ne peut pas être modélisée de manière fiable. On recommande d'utiliser pour un revêtement drainant, comme pour un revêtement dur, une résistance à l'écoulement de 20'000 Rayl. L'effet insonorisant sera pris en compte par la correction pour le revêtement effectuée dans le modèle d'émission.

**Champ libre** → **fenêtre ouverte** Normalement, l'évaluation des immissions de bruit se fait dans la fenêtre ouverte. Pour calculer le niveau correspondant en champ libre, on applique une correction forfaitaire de + 1dB<sup>27</sup>.

**Tramways** SonRoad renonce à formuler des valeurs d'émission pour les tramways. Étant donné la multitude de véhicules existants et la dispersion qui en résulte, il n'est guère possible de donner des valeurs s'appliquant de manière globale. Dans une situation particulière, pour laquelle les immissions en provenance d'une ligne de tramway sont censées être significatives, il est recommandé de déterminer des valeurs d'émission propres au parc de véhicules et au tracé concernés.

---

26. T. Van Renterghem et. al., Reducing Screen-Induced Refraction of Noise Barriers in Wind by Vegetative Screens, Acta Acustica United with Acustica, No. 2, p.231-238, vol. 88 (2002).

27. Méthode pour la détermination des valeurs extérieure des immissions avec des fenêtres fermées. Informations concernant l'Ordonnance sur la Protection contre le Bruit (OPB) No. 7, Office fédéral de l'Environnement, de la Forêt et du Paysage (OFEP) (1995).

**Précision** La précision du calcul effectué avec SonRoad dépend de divers facteurs :

- tolérances dans la définition de la géométrie
- incertitudes relatives à l'intensité de la source (volume de trafic, vitesse, valeurs d'émission)
- imprécisions inhérentes au modèle (dépendant de la distance source-récepteur, de la hauteur de propagation sur le sol, de la complexité de la topographie, de la présence éventuelle d'obstacles, ...)
- incertitudes liées à une prise en compte très sommaire des facteurs météorologiques

Par assimilation à ISO 9613-2, on peut admettre, en moyenne annuelle, une incertitude de l'ordre de 2 dB, dans le sens d'un écart type, à condition que la topographie ait été introduite correctement et que la distance ne dépasse pas quelque 100 m. A des distances plus importantes, l'incertitude croît en conséquence.

## 4 Comparaison de SonRoad avec StL-86

Lorsqu'on introduit un nouveau modèle, il y a lieu de se demander quels sont les écarts possibles relativement aux calculs faits avec modèle existant. Il n'existe, aucune réponse univoque ou péremptoire à cette interrogation. A l'aide de quelques situations test, calculées d'une part avec StL-86, d'autre part avec SonRoad, on peut montrer dans quelle mesure les résultats peuvent diverger. Pour la comparaison, on a utilisé la variante désignée par StL-86+. Dans cette variante, les niveaux d'émission ont été augmentés de 1 dB(A) par rapport au modèle original<sup>1</sup>. Le nouveau modèle SonRoad prend sommairement en considération l'influence de la météo, en introduisant un terme correctif  $K_{met}$  dans le calcul de l'effet d'obstacle, cet effet étant légèrement diminué dans des conditions propagatrices (vent portant ou couche d'inversion). Le calcul avec SonRoad a été effectué une fois en prenant en compte la correction météo (SonRoad<sub>F</sub>) et une fois sans cette correction (SonRoad<sub>N</sub>), soit dans des conditions de propagation neutres. La correction de +1 dB pour le calcul dans la fenêtre ouverte n'a pas été introduite, c'est-à-dire que le point récepteur est situé en champ libre.

On considère une route à deux voies, large de 8 m et longue de 1000 m. Le revêtement routier présente une résistance à l'écoulement  $\sigma = 20'000$  Rayl. Au milieu de chacune des voies, larges de 4 m, circulent à l'heure 1000 véhicules légers et 100 poids-lourds à une vitesse de 80 km/h. Le terrain dans le voisinage de la route est plat. Les points récepteurs sont situés sur une ligne perpendiculaire à la route, passant par le milieu du tronçon, à des distances de 20, 50, 100 et 200 m et à des hauteurs de 3 et 10 m. Les variantes suivantes ont été calculées :

- le terrain jouxtant la route est en gazon avec une résistance à l'écoulement  $\sigma = 300$  Rayl
- le terrain jouxtant la route est dur avec une résistance à l'écoulement  $\sigma = 20'000$  Rayl
- le terrain jouxtant la route est en gazon et inclut un écran antibruit de 3m de hauteur au bord de la chaussée
- le terrain jouxtant la route est en gazon et inclut un écran antibruit de 3m de hauteur au bord de la chaussée

Les résultats figurent dans les tableaux 4.1 et 4.2. Les calculs ont été effectués en utilisant un découpage de 5 m.

Dans les grandes lignes, les résultats suivants se dégagent de la comparaison :

- En l'absence d'obstacle, SonRoad fournit, avec un sol mou (gazon) des niveaux plus bas que StL-86. Avec sol dur, les niveaux sont plus élevés qu'avec StL-86.
- Avec des obstacles, les niveaux d'immission calculés avec SonRoad sont supérieurs à ceux fournis par St-L86.
- Les différences de niveau SonRoad - StL-86 se situent dans la fourchette -4...+6 dB(A).

---

1. Bruit routier: Corrections pour le modèle de calcul du bruit routier. Informations concernant l'Ordonnance sur la Protection contre le Bruit (OPB) No.6, Office fédéral de l'Environnement, de la Forêt et du Paysage (OFEFP) (1995).

Nature du sol	hauteur de paroi	distance	StL-86+	SonRoad <sub>F</sub> - StL-86+	SonRoad <sub>N</sub> - StL-86+
gazon	0 m	20 m	71.9	-1.4	-1.4
gazon	0 m	50 m	66.7	-2.3	-2.3
gazon	0 m	100 m	62.1	-4.0	-4.0
gazon	0 m	200 m	56.6	-4.4	-4.4
dur	0 m	20 m	71.9	1.4	1.4
dur	0 m	50 m	66.7	3.8	3.8
dur	0 m	100 m	62.1	5.1	5.1
dur	0 m	200 m	56.6	6.3	6.3
gazon	3 m	20 m	57.7	1.4	0.4
gazon	3 m	50 m	51.9	2.0	1.1
gazon	3 m	100 m	47.1	3.5	2.5
gazon	3 m	200 m	41.6	4.1	3.0
gazon	6 m	20 m	50.9	5.1	4.4
gazon	6 m	50 m	46.0	4.9	4.6
gazon	6 m	100 m	42.2	5.3	5.1
gazon	6 m	200 m	38.5	5.4	5.3

TAB. 4.1 – Comparaison des calculs d'immission effectués avec StL-86 et avec SonRoad pour un point récepteur situé à une hauteur de 3 m. SonRoad<sub>F</sub> se rapporte aux calculs pour des conditions propagatrices (effet d'obstacle réduit), SonRoad<sub>N</sub>, aux conditions neutres.

Nature du sol	hauteur de paroi	distance	StL-86+	SonRoad <sub>F</sub> - StL-86+	SonRoad <sub>N</sub> - StL-86+
gazon	0 m	20 m	71.9	1.3	1.3
gazon	0 m	50 m	67.5	-0.9	-0.9
gazon	0 m	100 m	63.5	-1.7	-1.7
gazon	0 m	200 m	58.8	-3.1	-3.1
dur	0 m	20 m	71.9	1.6	1.6
dur	0 m	50 m	67.5	1.0	1.0
dur	0 m	100 m	63.5	2.3	2.3
dur	0 m	200 m	58.8	4.0	4.0
gazon	3 m	20 m	66.1	2.3	2.1
gazon	3 m	50 m	55.1	0.9	-0.5
gazon	3 m	100 m	49.3	1.6	0.2
gazon	3 m	200 m	43.5	3.5	2.0
gazon	6 m	20 m	54.5	2.5	1.5
gazon	6 m	50 m	47.5	3.7	3.2
gazon	6 m	100 m	43.2	3.9	3.7
gazon	6 m	200 m	39.3	4.1	3.9

TAB. 4.2 – Comparaison des calculs d'immission effectués avec StL-86 et avec SonRoad pour un point récepteur situé à une hauteur de 10 m. SonRoad<sub>F</sub> se rapporte aux calculs pour des conditions propagatrices (effet d'obstacle réduit), SonRoad<sub>N</sub>, aux conditions neutres.



# 5 Perspectives - compléments et extensions futures du modèle

Le modèle proposé SonRoad représente une avancée essentielle par rapport à l'ancien modèle StL-86 et il correspond à l'état de la technique. Néanmoins, et à l'évidence, ce nouveau modèle présente des lacunes à plusieurs points de vue. La liste ci-dessous tente de dresser cette liste et constitue par-là même un moyen d'identifier les aspects du modèle susceptibles d'amélioration.

**Adaptation des valeurs d'émission à la conduite en accélération** SonRoad présuppose une vitesse constante du trafic. Jusqu'à présent, il n'est pas possible de quantifier l'augmentation de niveau sonore consécutive à une conduite en accélération. Même si, bien souvent, on observe des conditions de circulation à vitesse constante ou une prise de moyenne sur des conditions variables apparaît justifiée, on doit considérer qu'il existe des tronçons présentant un trafic en accélération, et cela de manière systématique.

**Caractéristique directionnelle verticale de la source** Sonroad admet que le véhicule émet du bruit de manière homogène dans toutes les directions. Dans un plan horizontal, cette assertion est justifiée et vérifiable. Un effet de prise de moyenne est, en effet, effectué lors d'un passage. Quant à la directivité verticale du rayonnement, il y a tout lieu de penser qu'elle n'est pas homogène. Dans le cas de points récepteurs situés en hauteur ou d'obstacles proches, surplombant la route, la directivité verticale peut détériorer grandement la précision des calculs.

**Correction spectrale pour le revêtement** Dans le présent modèle, on procède à une correction pour le revêtement de la chaussée en termes de niveau pondéré A, alors que celle-ci, par exemple dans le cas d'un revêtement drainant, dépend fortement de la fréquence. En outre, et ce n'est pas le moins important, au vu des recherches sur la perception subjective de la gêne inhérente au type de revêtement, l'introduction d'une correction dépendant de la fréquence apparaît comme importante.

**Modélisation de la propagation sur un revêtement drainant** Les premiers essais préliminaires ont montré que les propriétés resp. d'absorption et de réflexion des revêtements drainants ne peuvent pas être expliquées à partir du modèle d'impédance du sol de Delany et Bazley, qui fait appel à la résistance à l'écoulement et qui est utilisé dans SonRoad. Un modèle plus sophistiqué, encore à développer, devraient fournir des résultats plus fiables, en particulier dans le cas de points récepteurs proche d'une route comportant un revêtement drainant.

**Influence de la météo sur l'effet de sol** SonRoad ne considère le facteur météorologique que pour la détermination de l'effet de sol. Toutefois, à cause de la propagation curviligne du son dans le cas de stratification thermique et/ou en présence de vent, on observe une modification des conditions d'interférence entre son direct et son réfléchi par le sol (temps de parcours, angle de réflexion) de sorte qu'un effet de sol dépendant de la météo se produit. Dans le cadre d'un programme de recherche financé par l'OFROU, un modèle de bruit du trafic routier particulier, adapté à la propagation à grande distance, est en développement.

**Influence de la météo dans le cas de propagation régressive** SonRoad fait la distinction entre conditions de propagation neutres et progressives. A l'heure actuelle, le modèle ne dispose d'aucun instrument permettant de calculer une propagation régressive ou entravée (zones d'ombre). Une telle méthode serait souhaitable dans la perspective de pouvoir comparer les prédictions théoriques avec les résultats de mesurages effectués de jour, par temps ensoleillé (ce qui correspond à des conditions régressives).

**Réflexions multiples** SonRoad ne traite que de la première réflexion; en d'autres termes, les chemins sonores comportant plus d'une réflexion sont ignorés. Or dans le cas de structures verticales situées de part et d'autre de la route (p. ex. couloirs routiers), les réflexions multiples peuvent tout à fait être déterminantes pour le niveau d'immission. Il serait intéressant d'étudier la possibilité d'une extension du modèle permettant de traiter pareille situation.

**Simulation 3D complète** SonRoad analyse le terrain et les structures réfléchissantes uniquement en coupe. Une analyse effectuée en trois dimensions permettrait également de calculer automatiquement les réflexions dont le cheminement ne passe pas dans le plan vertical source-récepteur. Cela permettrait aussi de prendre en compte l'effet de diffraction sur des arêtes verticales.

# **A Déclaration de conformité pour la mise en application de SonRoad**

## Déclaration de conformité pour la mise en application de SonRoad

Bases:

*SonRoad*: modèle EMPA pour le calcul du bruit routier, OFEFP 2004.

*OPB*: Ordonnance fédérale sur la Protection contre le Bruit du 3 juillet 2001.

	oui	avec réserves	non
<b>Dans la configuration de base du programme, le niveau d'évaluation du bruit du trafic routier peut se calculer en un, ou en plusieurs points récepteurs, pour les conditions suivantes :</b>			
séparément pour le jour (06 - 22) et pour la nuit (22 - 06)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
en considérant plusieurs sources	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
en considérant un nombre donné de véhicules légers et de poids-lourds (SonRoad éq. 3.29)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
en considérant la correction pour le volume de trafic K1 (resp. OPB, Annexe 3; SonRoad éq. 3.32)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
en considérant un récepteur en champ libre ou à la fenêtre ouverte (SonRoad éq. 3.30)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
au choix pour des conditions de propagation neutres ou progressives (SonRoad éq. 3.15)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
<b>Dans la configuration de base du programme, les tracé polygonaux sont découpés correctement</b>			
sous forme de sources ponctuelles distantes de 5 m	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
à une hauteur de 0.45 m sur le niveau de la chaussée	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
<b>Dans la configuration de base du programme, la puissance acoustique des sources ponctuelles est calculée en considérant</b>			
la vitesse de circulation effective pour les véhicules légers et le poids-lourds (SonRoad éq. 3.3, 3.4)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
une correction éventuelle pour la pente (SonRoad éq. 3.1)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
une correction éventuelle pour le revêtement (SonRoad tableau 3.2)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
<b>Dans la configuration de base du programme, l'atténuation due à la propagation entre chaque point source et chaque point récepteur se calcule en tiers d'octave, à partir d'une coupe verticale</b>			
en identifiant tous les chemins sonores significatifs	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
en prenant en compte les termes d'atténuation suivants pour chaque chemin significatif			
décroissance géométrique (SonRoad éq. 3.10)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
atténuation dans l'air (SonRoad éq. 3.11)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
effet de sol, effet d'obstacle et réflexions en tenant compte de la nature du sol, de la dimension des réflecteurs et d'éventuelles pertes par réflexion sur les parois (SonRoad éq. 3.28)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
atténuation lors du passage à travers la végétation (SonRoad tableau 3.8)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
en additionnant les contributions de chaque chemin sonore en tenant compte de la phase et du facteur de perte de cohérence (3.25)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
<b>Dans la configuration de base du programme, les contributions de chaque source sont additionnées pour obtenir le niveau d'immission (SonRoad éq. 3.29)</b>			
<b>Dans la configuration de base du programme, les exemples de référence figurant dans SonRoad sont reproduits avec une précision de 0.2 dB.</b>			

TAB. A.1 – Déclaration de conformité pour la mise en application du modèle SonRoad.

# B Situations de référence calculées avec SonRoad

## B.1 Propagation de point à point

Voici une liste de 13 cas de référence bidimensionnels pour lesquels il faut trouver, à l'aide de l'algorithme, les chemins significatifs entre source et récepteur, ainsi que les valeurs de  $A_{gr/bar/refl}$  par tiers d'octave, dans des conditions de propagation progressive. Chaque situation est définie par un descriptif structuré de la manière suivante :

```
Ligne de commentaire
Coordonnées de la source [X Z] :  n.n  n.n
Coordonnées du récepteur [X Z] :  n.n  n.n
Nombre de segments de terrain :  n
Segment 1 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]:  n.n  n.n  n.n  n.n  n
Segment 2 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]:  n.n  n.n  n.n  n.n  n
```

On se base sur un système de coordonnées bidimensionnel. Après la spécification des coordonnées  $x$  et  $z$  de la source et du récepteur et la définition du nombre de segment de terrain, on introduit la liste des segments de terrain. Chaque ligne correspond à un segment, spécifié par ses deux extrémités. La fin d'un segment correspond au début du segment suivant. En plus de la définition des extrémités, on indique pour chaque segment une valeur de résistance à l'écoulement (segments de terrain) ou, pour les segments non situés sur le terrain, dont le nombre  $< 30$ , la perte par réflexion en dB.

## Cas 1

Ligne de commentaire

Coordonnées de la source [X Z]: 5.0 -4.55

Coordonnées du récepteur [X Z]: 16.0 -1.5

Nombre de segments de terrain: 8

Segment 1	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	3.7	2.7	1.0	0.0	0
Segment 2	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	1.0	0.0	1.0	-5.0	4
Segment 3	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	1.0	-5.0	10.0	-5.0	20000
Segment 4	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	10.0	-5.0	10.0	-0.5	8
Segment 5	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	10.0	-0.5	10.6	-0.5	8
Segment 6	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	10.6	-0.5	10.6	-4.0	8
Segment 7	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	10.6	-4.0	20.0	-4.0	20000
Segment 8	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	20.0	-4.0	20.0	-1.6	0

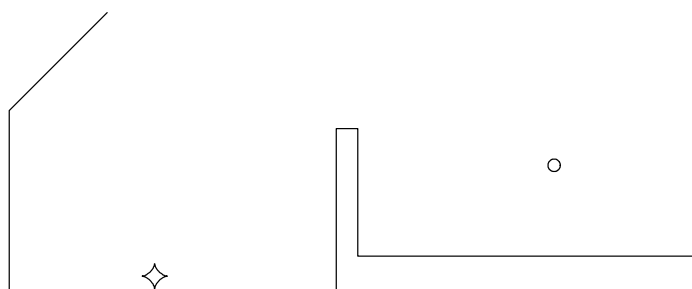


FIG. B.1 – Situation schématique pour le cas 1. Le losange désigne la source, le cercle, le récepteur.

Chemins significatifs : son direct, réflexion sur les segments 1, 2, 3, 7, 8.

Les valeurs d'atténuation sont présentées dans le tableau B.1.

50 Hz	63 Hz	80 Hz	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz
4.62	6.23	6.84	5.95	5.16	5.75	7.63	7.70
315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz
7.47	6.61	5.97	5.98	6.12	5.43	5.00	4.60
2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz	6300 Hz	8000 Hz	10000 Hz
4.65	4.60	4.60	4.61	4.74	4.52	4.62	4.67

TAB. B.1 – Valeurs par tiers d'octave de l'atténuation  $A_{gr/bar/refl}$  servant à décrire l'effet de sol, l'effet d'obstacle et d'éventuelles réflexions dans des conditions propagatives pour le cas 1.

## Cas 2

Ligne de commentaire

Coordonnées de la source [X Z]: 0.0 3.0

Coordonnées du récepteur [X Z]: 50.0 5.0

Nombre de segments de terrain: 7

Segment 1	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	-10.0	0.0	10.0	2.0	20000
Segment 2	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	10.0	2.0	11.0	7.0	300
Segment 3	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	11.0	7.0	12.0	2.0	300
Segment 4	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	12.0	2.0	22.0	1.0	300
Segment 5	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	22.0	1.0	23.0	8.0	300
Segment 6	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	23.0	8.0	24.0	0.0	300
Segment 7	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	24.0	0.0	60.0	0.0	300

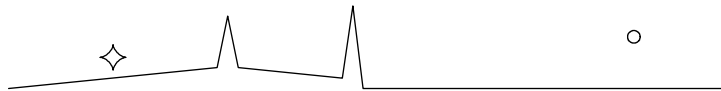


FIG. B.2 – Situation schématique pour le cas 2. Le losange désigne la source, le cercle, le récepteur.

Chemins significatifs : son direct, réflexion sur les segments 1, 7.

Les valeurs d'atténuation sont présentées dans le tableau B.2.

50 Hz	63 Hz	80 Hz	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz
8.11	13.51	18.92	14.69	13.80	16.65	12.38	11.04
315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz
19.64	17.29	15.05	15.79	15.44	16.22	17.08	16.70
2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz	6300 Hz	8000 Hz	10000 Hz
16.28	17.13	16.49	17.08	17.08	17.12	18.46	17.14

TAB. B.2 – Valeurs par tiers d'octave de l'atténuation  $A_{gr/bar/refl}$  servant à décrire l'effet de sol, l'effet d'obstacle et d'éventuelles réflexions dans des conditions propagatives pour le cas 2.

### Cas 3

Ligne de commentaire

Coordonnées de la source [X Z]: 8.0 1.0

Coordonnées du récepteur [X Z]: 16.0 -3.0

Nombre de segments de terrain: 9

Segment 1	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	-5.0	5.0	0.0	5.0	300
Segment 2	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	0.0	5.0	0.0	0.0	300
Segment 3	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	0.0	0.0	10.0	0.0	20000
Segment 4	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	10.0	0.0	10.0	-5.0	300
Segment 5	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	10.0	-5.0	11.0	-5.0	300
Segment 6	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	11.0	-5.0	12.0	-5.0	300
Segment 7	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	12.0	-5.0	25.0	-5.0	300
Segment 8	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	25.0	-5.0	28.0	3.0	300
Segment 9	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	28.0	3.0	35.0	3.0	300

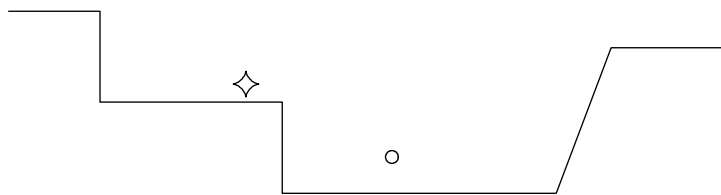


FIG. B.3 – Situation schématique pour le cas 3. Le losange désigne la source, le cercle, le récepteur.

Chemins significatifs : son direct, réflexion sur les segments 2, 5, 6, 7, 8.

Les valeurs d'atténuation sont présentées dans le tableau B.3.

50 Hz	63 Hz	80 Hz	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz
2.53	3.57	2.62	-0.59	-2.22	-1.39	2.15	-1.27
315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz
0.43	-0.84	-0.14	0.01	0.06	-0.31	-0.01	-0.08
2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz	6300 Hz	8000 Hz	10000 Hz
0.01	-0.05	0.01	-0.06	0.21	0.03	0.02	0.09

TAB. B.3 – Valeurs par tiers d'octave de l'atténuation  $A_{gr/bar/refl}$  servant à décrire l'effet de sol, l'effet d'obstacle et d'éventuelles réflexions dans des conditions propagatives pour le cas 3.

#### Cas 4

Ligne de commentaire

Coordonnées de la source [X Z]: -1.0 5.0

Coordonnées du récepteur [X Z]: 8.0 -6.0

Nombre de segments de terrain: 10

Segment 1	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	-11.0	4.0	-10.0	4.0	20000
Segment 2	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	-10.0	4.0	-9.5	9.0	20000
Segment 3	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	-9.5	9.0	-9.0	4.0	2
Segment 4	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	-9.0	4.0	10.0	4.0	20000
Segment 5	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	10.0	4.0	10.5	9.0	20000
Segment 6	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	10.5	9.0	11.0	4.0	20000
Segment 7	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	11.0	4.0	11.0	2.0	20000
Segment 8	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	11.0	2.0	-10.0	2.0	300
Segment 9	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	-10.0	2.0	-10.0	-8.0	2
Segment 10	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	-10.0	-8.0	15.0	-8.0	300

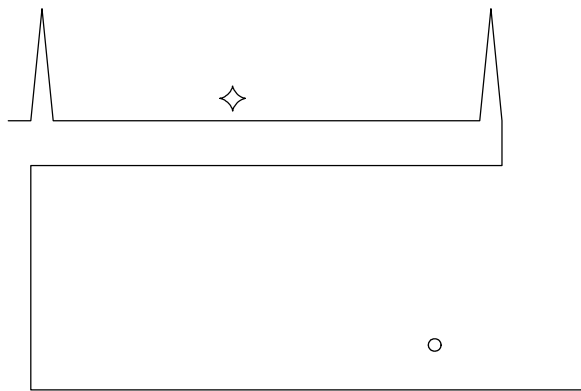


FIG. B.4 – Situation schématique pour le cas 4. Le losange désigne la source, le cercle, le récepteur.

Chemins significatifs : son direct, réflexion sur les segments 3, 4, 9, 10.

Les valeurs d'atténuation sont présentées dans le tableau B.4.

50 Hz	63 Hz	80 Hz	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz
17.50	16.09	13.32	12.57	16.09	22.05	19.08	17.97
315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz
15.34	13.38	13.92	19.14	14.12	16.57	14.33	15.44
2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz	6300 Hz	8000 Hz	10000 Hz
15.39	16.47	15.34	15.98	15.65	16.57	15.86	16.58

TAB. B.4 – Valeurs par tiers d'octave de l'atténuation  $A_{gr/bar/refl}$  servant à décrire l'effet de sol, l'effet d'obstacle et d'éventuelles réflexions dans des conditions propagatives pour le cas 4.



## Cas 5

Ligne de commentaire

Coordonnées de la source [X Z]: -5.0 3.5

Coordonnées du récepteur [X Z]: 40.0 2.0

Nombre de segments de terrain: 2

Segment 1 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: -10.0 0.0 5.0 -1.0 300

Segment 2 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 5.0 -1.0 50.0 1.0 300



FIG. B.5 – Situation schématique pour le cas 5. Le losange désigne la source, le cercle, le récepteur.

Chemins significatifs: son direct, réflexion sur les segments 1, 2.

Les valeurs d'atténuation sont présentées dans le tableau B.5.

50 Hz	63 Hz	80 Hz	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz
-5.68	-5.45	-5.10	-4.57	-3.70	-2.35	-0.56	1.73
315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz
4.68	6.38	2.09	-1.60	-3.12	-1.72	3.25	-1.51
2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz	6300 Hz	8000 Hz	10000 Hz
-1.34	-0.54	-0.26	-1.45	-1.05	-1.74	-0.99	-1.61

TAB. B.5 – Valeurs par tiers d'octave de l'atténuation  $A_{gr/bar/refl}$  servant à décrire l'effet de sol, l'effet d'obstacle et d'éventuelles réflexions dans des conditions propagatives pour le cas 5.

## Cas 6

Ligne de commentaire

Coordonnées de la source [X Z]: 0.0 1.0

Coordonnées du récepteur [X Z]: 100.0 1.5

Nombre de segments de terrain: 7

Segment 1 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: -20.0 0.0 10.0 0.0 300

Segment 2 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 10.0 0.0 38.0 0.0 300

Segment 3 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 38.0 0.0 39.0 0.0 300

Segment 4 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 39.0 0.0 40.0 0.0 300

Segment 5 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 40.0 0.0 41.0 0.0 300

Segment 6 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 41.0 0.0 43.0 0.0 300

Segment 7 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 43.0 0.0 110.0 0.0 300



FIG. B.6 – Situation schématique pour le cas 6. Le losange désigne la source, le cercle, le récepteur.

Chemins significatifs: son direct, réflexion sur les segments 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7.

Les valeurs d'atténuation sont présentées dans le tableau B.6.

50 Hz	63 Hz	80 Hz	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz
-5.86	-5.76	-5.60	-5.33	-4.88	-4.14	-2.92	-0.95
315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz
2.19	6.82	11.76	12.96	11.21	8.59	5.88	3.34
2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz	6300 Hz	8000 Hz	10000 Hz
1.04	-0.99	-2.71	-4.02	-4.73	-4.50	-2.88	-0.24

TAB. B.6 – Valeurs par tiers d'octave de l'atténuation  $A_{gr/bar/refl}$  servant à décrire l'effet de sol, l'effet d'obstacle et d'éventuelles réflexions dans des conditions propagatives pour le cas 6.

## Cas 7

Ligne de commentaire

Coordonnées de la source [X Z]: -5.0 4.5

Coordonnées du récepteur [X Z]: 26.0 7.0

Nombre de segments de terrain: 10

Segment 1	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	-10.0	3.0	7.0	3.0	300
Segment 2	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	7.0	3.0	7.0	-5.0	300
Segment 3	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	7.0	-5.0	10.0	-5.0	300
Segment 4	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	10.0	-5.0	10.0	-2.0	300
Segment 5	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	10.0	-2.0	15.0	-2.0	300
Segment 6	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	15.0	-2.0	15.0	-5.0	300
Segment 7	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	15.0	-5.0	35.0	-5.0	300
Segment 8	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	35.0	-5.0	35.0	5.0	300
Segment 9	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	35.0	5.0	30.0	5.0	300
Segment 10	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	30.0	5.0	30.0	5.5	300

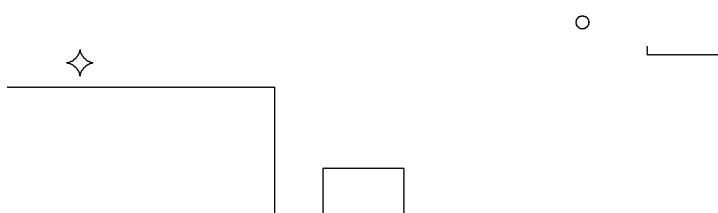


FIG. B.7 – Situation schématique pour le cas 7. Le losange désigne la source, le cercle, le récepteur.

Chemins significatifs: son direct, réflexion sur les segments 1, 5, 7, 8, 10.

Les valeurs d'atténuation sont présentées dans le tableau B.7.

50 Hz	63 Hz	80 Hz	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz
-1.73	-2.19	-3.92	-1.58	-1.74	-1.40	0.57	1.82
315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz
3.19	2.86	0.32	-1.94	-2.15	0.96	0.61	-1.94
2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz	6300 Hz	8000 Hz	10000 Hz
1.01	-1.06	-1.33	-0.71	-0.45	-1.34	-1.03	-1.41

TAB. B.7 – Valeurs par tiers d'octave de l'atténuation  $A_{gr/bar/refl}$  servant à décrire l'effet de sol, l'effet d'obstacle et d'éventuelles réflexions dans des conditions propagatives pour le cas 7.

## Cas 8

Ligne de commentaire

Coordonnées de la source [X Z]: -5.0 4.5

Coordonnées du récepteur [X Z]: 30.0 2.0

Nombre de segments de terrain: 7

Segment 1 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: -10.0 3.0 7.0 3.0 300

Segment 2 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 7.0 3.0 7.0 -5.0 300

Segment 3 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 7.0 -5.0 15.0 -5.0 300

Segment 4 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 15.0 -5.0 15.0 -2.0 300

Segment 5 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 15.0 -2.0 25.0 -2.0 300

Segment 6 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 25.0 -2.0 25.0 -5.0 300

Segment 7 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 25.0 -5.0 35.0 -5.0 300

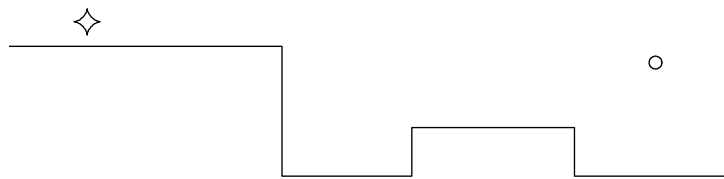


FIG. B.8 – Situation schématique pour le cas 8. Le losange désigne la source, le cercle, le récepteur.

Chemins significatifs : son direct, réflexion sur les segments 5, 7.

Les valeurs d'atténuation sont présentées dans le tableau B.8.

50 Hz	63 Hz	80 Hz	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz
-1.09	0.56	2.63	1.61	1.36	-1.02	-1.87	0.27
315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz
0.76	-1.09	0.55	-0.22	-0.16	0.03	-0.22	-0.01
2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz	6300 Hz	8000 Hz	10000 Hz
0.37	-0.04	-0.03	-0.16	-0.09	-0.08	0.18	0.03

TAB. B.8 – Valeurs par tiers d'octave de l'atténuation  $A_{gr/bar/refl}$  servant à décrire l'effet de sol, l'effet d'obstacle et d'éventuelles réflexions dans des conditions propagatives pour le cas 8.

## Cas 9

Ligne de commentaire

Coordonnées de la source [X Z]: 2.0 1.0

Coordonnées du récepteur [X Z]: 20.0 5.0

Nombre de segments de terrain: 6

Segment 1 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 0.0 0.0 3.0 0.0 300

Segment 2 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 3.0 0.0 3.5 4.0 300

Segment 3 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 3.5 4.0 12.0 0.0 300

Segment 4 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 12.0 0.0 12.0 10.0 300

Segment 5 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 12.0 10.0 13.0 0.0 300

Segment 6 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 13.0 0.0 30.0 0.0 300

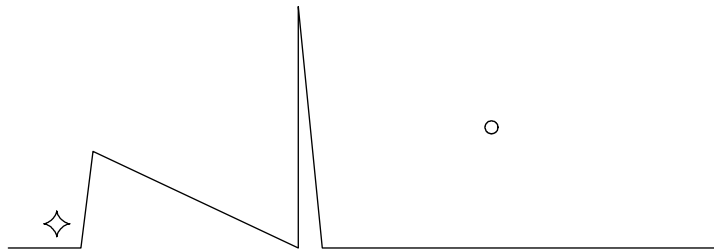


FIG. B.9 – Situation schématique pour le cas 9. Le losange désigne la source, le cercle, le récepteur.

Chemins significatifs: son direct, réflexion sur les segments 1, 6.

Les valeurs d'atténuation sont présentées dans le tableau B.9.

50 Hz	63 Hz	80 Hz	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz
10.90	16.85	19.90	19.68	15.52	15.95	14.72	17.62
315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz
16.35	15.21	15.83	17.46	16.14	15.93	17.40	17.24
2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz	6300 Hz	8000 Hz	10000 Hz
17.39	17.45	18.40	18.99	18.19	17.92	18.65	19.83

TAB. B.9 – Valeurs par tiers d'octave de l'atténuation  $A_{gr/bar/refl}$  servant à décrire l'effet de sol, l'effet d'obstacle et d'éventuelles réflexions dans des conditions propagatives pour le cas 9.

## Cas 10

Ligne de commentaire

Coordonnées de la source [X Z]: 1.0 2.0

Coordonnées du récepteur [X Z]: 6.0 2.0

Nombre de segments de terrain: 7

Segment 1	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	0.0	0.0	3.0	0.0	300
Segment 2	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	3.0	0.0	3.0	4.0	300
Segment 3	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	3.0	4.0	3.5	4.0	300
Segment 4	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	3.5	4.0	3.5	0.0	300
Segment 5	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	3.5	0.0	12.0	0.0	300
Segment 6	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	12.0	0.0	12.0	10.0	300
Segment 7	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	12.0	10.0	8.0	14.0	300

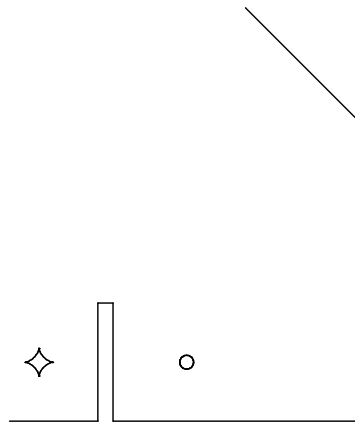


FIG. B.10 – Situation schématique pour le cas 10. Le losange désigne la source, le cercle, le récepteur.

Chemins significatifs : son direct, réflexion sur les segments 1, 5, 6, 7.

Les valeurs d'atténuation sont présentées dans le tableau B.10.

50 Hz	63 Hz	80 Hz	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz
16.56	13.16	8.39	7.96	10.10	15.82	10.61	16.56
315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz
13.75	15.09	16.97	17.94	16.86	19.00	18.00	14.98
2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz	6300 Hz	8000 Hz	10000 Hz
16.80	19.84	17.96	17.18	17.50	19.32	18.54	18.92

TAB. B.10 – Valeurs par tiers d'octave de l'atténuation  $A_{gr/bar/refl}$  servant à décrire l'effet de sol, l'effet d'obstacle et d'éventuelles réflexions dans des conditions propagatives pour le cas 10.

## Cas 11

Ligne de commentaire

Coordonnées de la source [X Z]: 6.0 0.45

Coordonnées du récepteur [X Z]: 25.0 14.0

Nombre de segments de terrain: 4

Segment 1 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: -5.0 5.0 0.0 5.0 300

Segment 2 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 0.0 5.0 2.0 0.0 300

Segment 3 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 2.0 0.0 20.0 0.0 20000

Segment 4 [X1 Z1 X2 Z2 sigma]: 20.0 0.0 30.0 0.0 300

o



FIG. B.11 – Situation schématique pour le cas 11. Le losange désigne la source, le cercle, le récepteur.

Chemins significatifs: son direct, réflexion sur les segments 2, 3, 4.

Les valeurs d'atténuation sont présentées dans le tableau B.11.

50 Hz	63 Hz	80 Hz	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz
-6.85	-4.73	-5.00	-5.51	-4.00	-2.80	-1.33	2.11
315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz
8.10	1.39	-3.72	-5.70	-2.99	1.84	-5.06	0.77
2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz	6300 Hz	8000 Hz	10000 Hz
-3.36	-3.14	-2.20	-3.21	-2.33	-3.12	-2.51	-2.25

TAB. B.11 – Valeurs par tiers d'octave de l'atténuation  $A_{gr/bar/refl}$  servant à décrire l'effet de sol, l'effet d'obstacle et d'éventuelles réflexions dans des conditions propagatives pour le cas 11.

## Cas 12

Ligne de commentaire

Coordonnées de la source [X Z]: 5.0 -4.55

Coordonnées du récepteur [X Z]: 16.0 -1.5

Nombre de segments de terrain: 8

Segment 1	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	3.7	2.7	1.0	0.0	0
Segment 2	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	1.0	0.0	1.0	-5.0	4
Segment 3	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	1.0	-5.0	10.0	-5.0	20000
Segment 4	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	10.0	-5.0	10.0	2.5	8
Segment 5	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	10.0	2.5	10.6	2.5	8
Segment 6	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	10.6	2.5	10.6	-4.0	8
Segment 7	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	10.6	-4.0	20.0	-4.0	20000
Segment 8	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	20.0	-4.0	20.0	-1.6	0

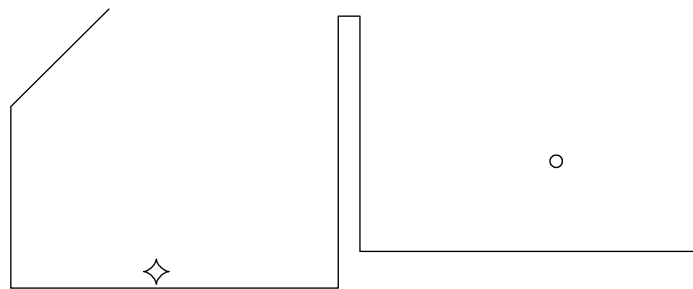


FIG. B.12 – Situation schématique pour le cas 12. Le losange désigne la source, le cercle, le récepteur.

Chemins significatifs : son direct, réflexion sur les segments 1, 2, 3, 7, 8.

Les valeurs d'atténuation sont présentées dans le tableau B.12.

50 Hz	63 Hz	80 Hz	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz
12.69	12.03	10.20	10.19	13.99	19.31	16.59	17.28
315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz
16.08	13.84	13.08	17.56	15.37	14.41	15.17	15.78
2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz	6300 Hz	8000 Hz	10000 Hz
14.86	14.40	15.81	15.65	15.72	15.48	14.81	14.10

TAB. B.12 – Valeurs par tiers d'octave de l'atténuation  $A_{gr/bar/refl}$  servant à décrire l'effet de sol, l'effet d'obstacle et d'éventuelles réflexions dans des conditions propagatives pour le cas 12.



### Cas 13

Ligne de commentaire

Coordonnées de la source [X Z]: 32.0 0.45

Coordonnées du récepteur [X Z]: 70.0 3.0

Nombre de segments de terrain: 8

Segment 1	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	0.0	2.5	4.7	2.5	300
Segment 2	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	4.7	2.5	4.7	5.5	1
Segment 3	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	4.7	5.5	5.0	5.5	1
Segment 4	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	5.0	5.5	5.0	2.5	1
Segment 5	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	5.0	2.5	7.5	0.0	300
Segment 6	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	7.5	0.0	25.0	0.0	300
Segment 7	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	25.0	0.0	35.0	0.0	20000
Segment 8	[X1 Z1 X2 Z2 sigma]:	35.0	0.0	80.0	0.0	300



FIG. B.13 – Situation schématique pour le cas 13. Le losange désigne la source, le cercle, le récepteur.

Chemins significatifs: son direct, réflexion sur les segments 4, 7, 8.

Les valeurs d'atténuation sont présentées dans le tableau B.13.

50 Hz	63 Hz	80 Hz	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz
-5.81	-5.72	-5.59	-5.40	-5.11	-4.69	-4.09	-3.25
315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz
-2.11	-0.68	0.99	2.73	4.17	4.40	2.86	0.51
2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz	6300 Hz	8000 Hz	10000 Hz
-1.62	-2.99	-3.07	-0.78	3.78	-1.76	-2.90	0.40

TAB. B.13 – Valeurs par tiers d'octave de l'atténuation  $A_{gr/bar/refl}$  servant à décrire l'effet de sol, l'effet d'obstacle et d'éventuelles réflexions dans des conditions propagatives pour le cas 13.

## B.2 Longue route rectiligne

On considère une route large de 4 m et longue de 1000 m. La chaussée présente une résistance à l'écoulement de  $\sigma = 20'000$  Rayl. Au milieu de la route, circulent à l'heure 1000 véhicules légers et 100 poids-lourds à une vitesse de 80 km/h. Le terrain dans le voisinage de la route présente une résistance à l'écoulement  $\sigma = 300$  Rayl. Deux points récepteurs sont situés sur une ligne perpendiculaire à la route, passant par le milieu du tronçon, à une distance de 100 m et à des hauteurs de 3 et 10 m. Les tableaux B.14 und B.15 indiquent les niveaux résultants en tiers d'octave (non pondérés A).

50 Hz	63 Hz	80 Hz	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz
-99.9	-99.9	-99.9	61.1	57.3	55.6	53.7	50.2
315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz
46.4	42.7	40.2	39.4	40.9	43.2	45.0	45.6
2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz	6300 Hz	8000 Hz	10000 Hz
43.9	41.7	41.8	42.5	38.5	-99.9	-99.9	-99.9

TAB. B.14 – Niveau d'immission par bandes de tiers d'octave au point récepteur situé à 3 m de hauteur, dans le cas d'une longue route rectiligne. Le niveau global pondéré A est de 55.1 dB(A).

50 Hz	63 Hz	80 Hz	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz
-99.9	-99.9	-99.9	60.6	56.9	55.4	54.0	51.8
315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz
49.8	47.9	46.3	45.0	45.9	48.3	50.7	51.6
2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz	6300 Hz	8000 Hz	10000 Hz
49.5	46.1	43.7	40.5	35.5	-99.9	-99.9	-99.9

TAB. B.15 – Niveau d'immission par bandes de tiers d'octave au point récepteur situé à 10 m de hauteur, dans le cas d'une longue route rectiligne. Le niveau global pondéré A est de 59.0 dB(A).

# C Proposition de stratégie visant à identifier les chemins sonores significatifs

## C.1 Généralités

On part de l'hypothèse selon laquelle la topographie, y compris les réflecteurs et les obstacles éventuels, est représentée en coupe par un tracé polygonal composé de segments rectilignes. Chacun des segments est soit un segment de sol, soit un segment de réflecteur. Du point de vue acoustique, les segments de sol sont décrits par leur résistance à l'écoulement. Les segments de réflecteur sont caractérisés par la perte par réflexion relativement à une réflexion totale sur une surface dure. Un tracé polygonal se compose de  $n$  segments, tels que l'extrémité du segment  $n^{\circ} i$  coïncide avec l'origine du segment  $n^{\circ} i + 1$ . Le point source est situé sur le segment  $i_{\text{Quellensegment}}$ , le point récepteur sur le segment  $i_{\text{Empfängersegment}}$ . Une portion de sol plan, mais inhomogène du point de vue de la nature du sol, se décrit par plusieurs segments présentant des propriétés différentes. Un obstacle entraîne automatiquement le découpage du segment qui le traverse. La figure C.1 présente un exemple de profil topographique.

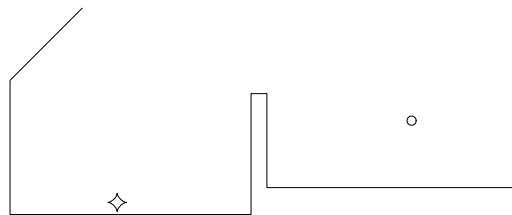


FIG. C.1 – Exemple de profil topographique. Le losange désigne la source, le cercle, le récepteur.

L'identification des chemins significatifs requiert une ligne auxiliaire passant resp. juste (p.ex. 0.001 m) en dessous ou à côté du tracé réel du terrain (Figure C.2).

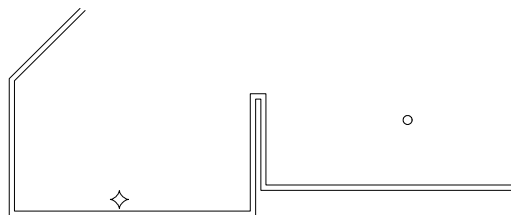


FIG. C.2 – L'exemple de profil topographique de la figure C.1, avec la ligne auxiliaire. Pour des raisons de lisibilité, la distance à la ligne auxiliaire a été délibérément exagérée.

Le procédé destiné à identifier les chemins significatifs peut se décomposer en cinq étapes :

1. Recherche du chemin direct
2. Construction des chemins réfléchis potentiels
3. Première élimination des chemins réfléchis non valides
4. Redressement éventuel de chemins réfléchis
5. Seconde élimination des chemins réfléchis non valides

## C.2 Recherche du chemin direct

Pour identifier le chemin du son direct, on applique le processus itératif décrit ci-dessous. A cet effet, on fait appel à un point auxiliaire variable  $S'$ .

1. Le point auxiliaire  $S'$  est identifié au point source.
2. On contrôle si le point récepteur est directement visible depuis  $S'$ . Ce contrôle s'effectue en inspectant les intersections des lignes auxiliaires rattachées aux segments situés entre la source et le récepteur, soit pour  $i_{\text{Quellensegment}} < i < i_{\text{Empfaengersegment}}$ . On admet qu'un segment qui n'est pas situé entre la source et le récepteur ne peut pas représenter un obstacle. Dès qu'il existe une vue directe, on interrompt le processus itératif.
3. On recherche l'extrémité du segment de terrain  $T_i$  correspondant à l'indice  $i$  le plus élevé, tel qu'il existe une liaison libre à  $S'$ . Le critère permettant de dire que la liaison est libre consiste à vérifier qu'il n'existe aucune intersection entre la ligne  $S' \rightarrow T_i$  et la ligne auxiliaire du terrain. Cette recherche ne porte que sur les segments situés entre la source et le récepteur, soit pour  $i_{\text{Quellensegment}} < i < i_{\text{Empfaengersegment}}$ . Il est à exclure que le chemin ne contourne resp. le premier ou le dernier point polygonal du terrain.
4.  $T_i$  constitue le nouveau point auxiliaire  $S'$ .
5. Retour à l'étape 2.

Le processus itératif décrit ci-dessus s'interrompt par la condition de l'étape 2. L'ensemble des points auxiliaires  $S'$ , conjointement avec le point récepteur, représente le chemin direct (Figure C.3).

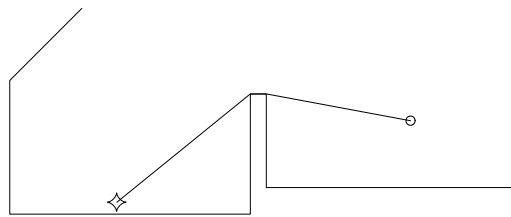


FIG. C.3 – Chemin direct pour la situation représentée dans la Figure C.1.

## C.3 Construction des chemins réfléchis potentiels

En principe, on ne considère que les premières réflexions. Les chemins possibles s'obtiennent par symétrie relativement à tous les segments polygonaux du terrain. En supposant que la source se trouve au-dessus du segment  $i_{\text{Quellensegment}}$ , on construit la réflexion sur le segment  $j$  de la manière suivante :

1. On construit l'image symétrique de la source par rapport à la droite contenant le segment  $j$ .
2. On construit l'image par rapport à la droite du segment  $j$  de chaque segment compris entre  $j$  (exclus) et  $i_{\text{Quellensegment}}$  (inclus), y compris des lignes auxiliaires.
3. On renumérote les segments en commençant par celui qui se trouve sous l'image de la source et en finissant par celui situé sous le point récepteur. Il faut noter que, en partie, les origines et les extrémités des segments peuvent être permutés, de par l'opération de symétrie. La suite des opérations se base sur cette nouvelle topographie.
4. Le segment  $j$  est éliminé, de sorte que, en règle générale, il en résulte un trou. Dans cette nouvelle situation, comprenant une certaine proportion d'images, on procède à la détermination du chemin sonore, de la même manière que dans le cas du son direct (voir Figure C.4). Comme pour le son direct, on veillera à ce que le chemin sonore ne contourne ni le premier, ni le dernier point polygonal, à l'exception du cas où la réflexion se produit sur le premier ou le dernier segment de terrain. Le chemin sonore ainsi déterminé présente, à l'endroit du segment manquant  $j$ , une coupure pouvant se trouver soit dans le segment, soit à une de ses extrémités, soit en dehors.

La figure C.4 montre, à titre d'exemple, un chemin réfléchi construit à partir d'une représentation inversée.

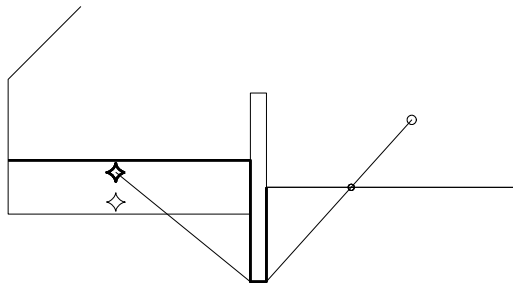


FIG. C.4 – Exemple de construction d'un chemin réfléchi. La ligne fine représente la topographie originale. La ligne épaisse montre, en représentation inversée, le profil du terrain considéré et le chemin réfléchi.

## C.4 Première élimination des chemins réfléchis non valides

Parmi les chemins réfléchis qui ont été trouvés, on élimine ceux qui ne sont pas valides. Un chemin valide doit, dans sa forme inversée, remplir les trois conditions suivantes :

1. Lorsque le segment réfléchi se trouve entre le segment source et le segment récepteur, le chemin résultant obtenu par symétrie relativement au segment de terrain  $j$  doit couper ce dernier segment ou passer par une des extrémités du segment.
2. Le chemin obtenu par symétrie relativement au segment de terrain  $j$  génère, conjointement avec resp. le segment de terrain  $j$  ou la ligne droite associée, le point d'intersection  $P$ . On a alors les conditions suivantes :
  - Le tronçon du chemin côté source, visible de  $P$  doit couper d'abord - en regardant depuis la source - la ligne auxiliaire non réfléchie du segment de terrain  $j$ , puis, ensuite, le segment de terrain  $j$ .
  - Le tronçon du chemin côté récepteur, visible de  $P$  doit couper d'abord - en regardant depuis le récepteur - le segment de terrain  $j$ , puis, ensuite, la ligne auxiliaire non réfléchie du segment de terrain  $j$ .
3. Le chemin obtenu par symétrie relativement au segment de terrain  $j$  ne doit comporter aucun tronçon qui soit identique avec le segment de terrain  $j$ .

## C.5 Redressement éventuel de chemins réfléchis

Si le chemin obtenu par symétrie relativement au segment de terrain  $j$  passe par une des extrémités de ce segment, ce chemin doit être redressé. En pareil cas, le point de réflexion ne se situe pas sur le segment de terrain à l'origine de la symétrie. Cependant, la réflexion sera tout d'abord poursuivie et ce n'est qu'après comparaison avec la zone de Fresnel qu'elle subira une atténuation. Le redressement s'effectue par suppression du point du chemin coïncidant avec l'extrémité du segment (fin de la coupure); en fait, on crée une liaison directe entre les deux points voisins du chemin. Le point de réflexion virtuel correspond à l'intersection du chemin redressé avec la droite associée au segment de terrain  $j$ .

Si il n'y a pas lieu d'effectuer un redressement, on détermine le point de réflexion en coupant la droite associée au segment par chacun des tronçons du chemin et en cherchant le point qui se trouve à l'intérieur du segment de terrain  $j$  ou qui présente la plus faible distance par rapport aux extrémités. Lorsqu'il n'existe aucune intersection entre la droite associée au segment et le tronçon du chemin, on rejette le chemin en question.

## C.6 Seconde élimination des chemins réfléchis non valides

Après d'éventuelles opérations de redressement de chemins réfléchis, il reste à effectuer un dernier test de validité :

- le chemin, dans sa forme d'image, ne doit pas présenter une allure en zigzag; c'est à dire, il doit être soit concave, soit convexe. Ce test peut, par exemple, être effectué à l'aide de produits

vectoriels. La composante  $z$  du produit vectoriel de deux tronçons successifs du chemin doit avoir le même signe.

Si le résultat du test est positif, on a la certitude que l'effet d'obstacle des chemins restants peut être déterminé en conformité avec ISO 9613-2.

La figure C.5 indique tous les chemins valides pour l'exemple de topographie de la figure C.1.

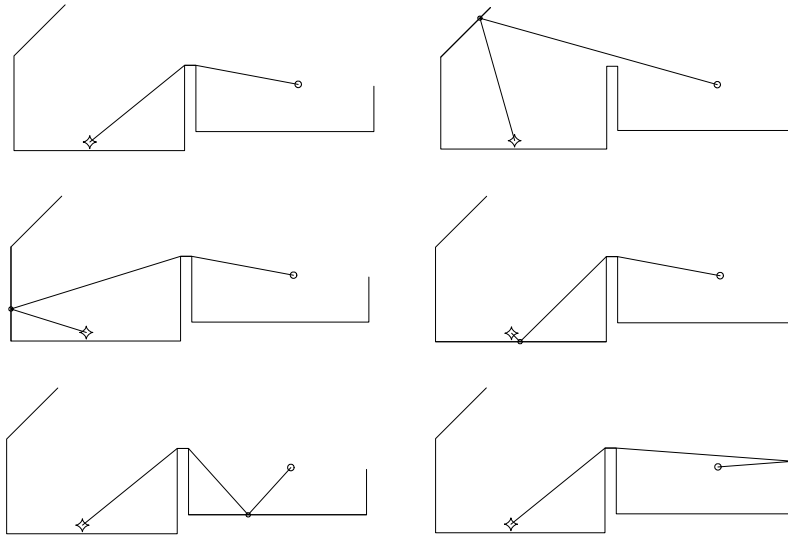


FIG. C.5 – chemins sonores significatifs sous forme réfléchié pour l'exemple de topographie de la figure C.1.

# D Représentation complexe de grandeurs sinusoïdales

Les grandeurs variant selon une loi sinusoïdale peuvent se représenter par des vecteurs dans le plan complexe. Le vecteur a une longueur fixe, correspondant à l'amplitude, et il tourne à une vitesse constante, correspondant à la fréquence circulaire, dans le sens contraire aux aiguilles d'une montre (sens positif des mathématiques). La pointe du vecteur figure un nombre complexe, dont la partie imaginaire décrit le comportement sinusoïdal de la fonction (Figure D.1).

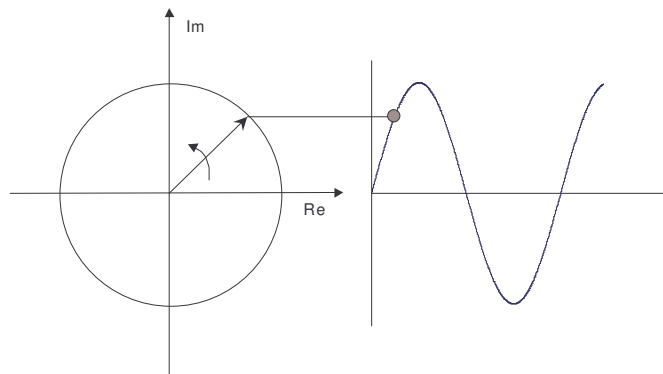


FIG. D.1 – Représentation d'une variable sinusoïdale par la partie imaginaire d'un vecteur tournant dans le plan complexe.

La variable  $p$ :

$$p(t) = \hat{p} \sin(\omega t + \phi) \quad (\text{D.1})$$

est appliquée sur le vecteur  $\underline{p}$ :

$$\underline{p}(t) = \hat{p} e^{j\omega t + \phi} \quad (\text{D.2})$$

# E Évaluation numérique de wofz(z) (fonction d'erreur)

Pascal (Delphi) Notation:

```
procedure wofz(z:complex; var out:complex);
{  procedure to calculate the function  $w(z) = \exp(-z^2)*\operatorname{erfc}(-iz)$ 
  where erfc is the complex errorfunction.
  Algorithm according to
  Collected Algorithms from ACM no. 363
  REF: W. Gautschi, Efficient computation of the complex error function
  SIAM J. Numer. Anal. v.7, no.1, 1970. }
var  x,y,real,im : real;
     capn,nu,n,np1 : integer;
     h,h2,lambda,r1,r2,s,s1,s2,t1,t2,c : real;
     b : boolean;
     quadrant : integer;
begin
  x := z.r;  y := z.i;
  { the original algorithm works only in the first quadrant.
    here it is extended for the 4. quadrant by using
    the relations  $w(z') = w(-z)'$  and  $w(-z) = 2*\exp(-2^2)-w(z)$ 
    where ' means conj. complex }
  if y >= 0.0 then quadrant := 1 else quadrant := 4;
  if quadrant = 4 then y := -y;

  { start of the original algorithm }
  if ((y < 4.29) and (x < 5.33)) then
  begin
    s := (1.0-y/4.29)*sqrt(1.0-x*x/28.41);
    h := 1.6*s;
    h2 := 2.0*h;
    capn := 6 + round(23.0*s);
    nu := 9 + round(21.0*s);
  end
  else
  begin
    h := 0.0;
    capn := 0;
    nu := 8;
  end;
  if h > 0.0 then lambda := exp(capn*ln(h2));
  b := ((h = 0) or (lambda = 0));
  r1 := 0.0;
  r2 := 0.0;
  s1 := 0.0;
  s2 := 0.0;
  for n := nu downto 0 do
  begin
    np1 := n+1;
    t1 := y+h+(np1*r1);
    t2 := x-(np1*r2);
    c := 0.5/(t1*t1 + t2*t2);
    r1 := c*t1;
    r2 := c*t2;
```



```

    if ((h > 0) and (n <= capn)) then
    begin
        t1 := lambda+s1;
        s1 := r1*t1 - r2*s2;
        s2 := r2*t1 + r1*s2;
        lambda := lambda/h2;
    end;
end;
if (y = 0) then re := exp(-x*x) else
begin
    if b = true then re := 1.12837916709551*r1 else
        re := 1.12837916709551*s1;
end;
if b = true then im := 1.12837916709551*r2 else
    im := 1.12837916709551*s2;

if quadrant = 4 then
begin
    re := re;
    im := -im;
    re := 2.0*exp(sqr(y)-sqr(x))*cos(2.0*x*y) - re;
    im := 2.0*exp(sqr(y)-sqr(x))*sin(2.0*x*y) - im;
end;

    out.r := re;
    out.i := im;
end; {wofz}

```

*Exemples chiffrés:*

$wofz(0.1 + j0.3) = 7.29337265621325E - 0001 + j6.84103609909243E - 0002$   
 $wofz(0.6 - j0.3) = 8.59651234150988E - 0001 + j8.82483015439902E - 0001$   
 $wofz(5.1 + j6.4) = 5.41284773433404E - 0002 + j4.24988961431723E - 0002$

# F Estimation du paramètre de perte de cohérence

La superposition des contributions des divers chemins sonores (son direct et réflexions par le sol) ne se fait pas de manière totalement cohérente. L'équation 3.26 ci-dessus propose une méthode empirique pour la détermination du facteur de cohérence. Les paramètres libres  $\gamma_0$  et  $\gamma$  sont optimisés sur la base des mesurages de propagation acoustiques de Parkin et Scholes<sup>1</sup> souvent citées dans la littérature, et sur les dépouillements de ces mesurages effectués par Daigle<sup>2</sup>. Les résultats relatifs à des conditions d'atmosphère neutre et d'absence de vent ont été exploités. La figure F.1 montre la bonne correspondance entre mesurages et calcul.

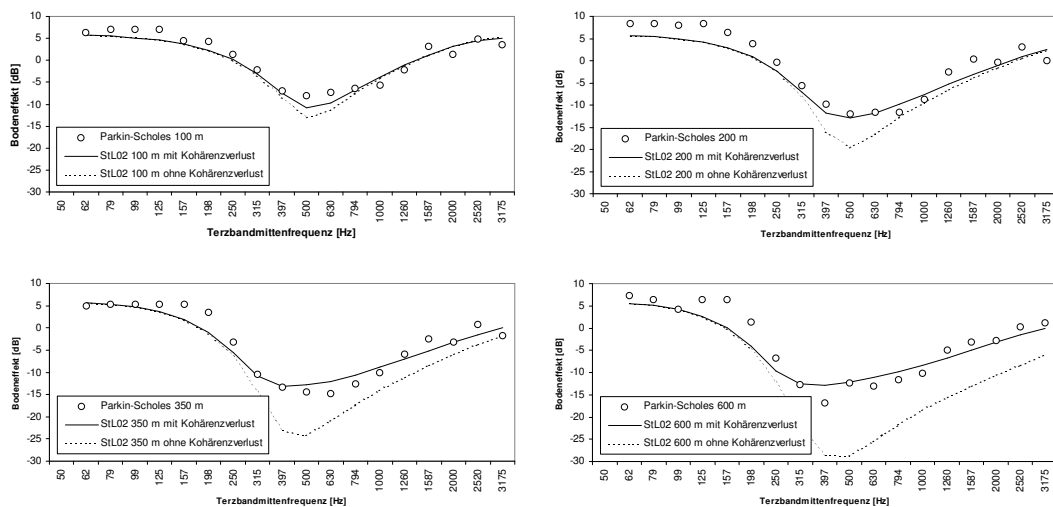


FIG. F.1 – Comparaison des résultats de mesurages de Parkin et Scholes avec les calculs au moyen de SonRoad dans le cas d'un sol herbeux ( $\sigma = 300 \text{ Rayl}$ ) resp. avec et sans prise en compte de la perte de cohérence, pour des distances de 100 m, 200 m, 350 m et 600 m. La hauteur de la source et du récepteur étaient respectivement de 1.8 m et 1.5 m. Les valeurs représentent des niveaux en tiers d'octave.

1. P. H. Parkin, W. F. Scholes, The Horizontal Propagation of Sound From a Jet Engine Close to the Ground at Hatfield, Journal of Sound and Vibration, vol. 2, p.353-374 (1965).

2. G. A. Daigle, Effects of atmospheric turbulence on the interference of sound waves above a finite impedance boundary, Journal of the Acoustical Society of America, vol. 65, p.45-49 (1979).

# G Atténuation du filtre A dans les bandes de tiers d'octave

La pondération A des spectres en tiers d'octave s'effectue en appliquant les valeurs d'amplification figurant dans le tableau G.1. Elles proviennent de la prise de moyenne sur 11 points de la courbe A<sup>1</sup> distribués géométriquement dans chacun des tiers d'octave. Il faut noter qu'il peut en résulter de petites différences par rapport à la pondération A appliquée à la fréquence centrale du tiers d'octave.

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

TAB. G.1 – Pondération A en dB pour les différentes bandes de tiers d'octave. Les valeurs positives correspondent à une amplification, les valeurs négatives à une atténuation.

1. IEC 61672-1 Electroacoustics - Sound level meters - Part 1: Specifications (2002).

# H Concept des zones de Fresnel

Le traitement théorique d'une réflexion sur une surface peut être ramené à l'intégrale de Kirchhoff-Helmoltz dans le domaine des fréquences (H.1).

$$\check{p}(x,y,z,\omega) = \frac{1}{4\pi} \int_S \left( j\omega\rho_0\check{v}_S(\omega)\frac{e^{-j\omega r/c}}{r} + \check{p}_S(\omega)\frac{\partial}{\partial n}\frac{e^{-j\omega r/c}}{r} \right) dS \quad (\text{H.1})$$

L'intégrale de l'éq. H.1, décrivant la pression acoustique  $p$  au point récepteur  $(x; y; z)$ , correspond à la somme des contributions de sources monopolaires et dipolaires situées sur une surface enveloppe  $S$  (sources secondaires d'après le principe de Huygens). Souvent, l'amplitude ne varie que lentement au cours de l'intégration sur  $S$ , si bien que, pour simplifier, on peut simplement ne considérer que la variation de la phase. Une autre simplification intervient lorsqu'on peut affecter la phase à l'une des deux classes +1 (0...180°) et -1 (180...360°). L'intégration des contributions (éq. H.1) tenant compte de la phase se réduit alors à des additions ou des soustractions d'amplitudes. En normalisant les phases de sorte que la phase la plus petite soit nulle, on peut numéroter les classes de phase avec un compteur  $n$ , la phase de la classe  $n^\circ$  se situant dans l'intervalle  $(n-1) \times 180^\circ \dots n \times 180^\circ$ . Les classes du type +1 (contributions positives) ont un  $n$  impair, les classes du type -1, un  $n$  pair. Un secteur de la surface  $S$ , dont les contributions appartenant à la classe de phase  $n^\circ$  atteignent le point récepteur, est appelé zone de Fresnel  $n^\circ$   $n^1$ . La taille d'une zone de Fresnel dépend de la fréquence, de part le fait que les basses fréquences engendrent de grandes zones de Fresnel, et les fréquences élevées, de petites zones. Sur une surface plane, les zones de Fresnel revêtent la forme d'anneaux ellipsoïdes. La pression acoustique au point récepteur s'obtient par addition et soustraction des contributions des zones consécutives, proportionnellement à leurs aires respectives. Dans ce processus, les contributions se compensent les unes, les autres dans une large mesure, de sorte, qu'en fin de compte, il ne subsiste plus que la part provenant de la moitié de la première zone de Fresnel. La première zone de Fresnel peut être considérée comme le secteur significatif pour ce qui est de la réflexion. Au cas où le réflecteur serait si petit que la première zone de Fresnel n'y a pas place, la contribution est réduite dans le rapport de l'aire du réflecteur à celle de la première zone de Fresnel.

Jusqu'ici, on a considéré que la contribution à la pression acoustique était la même pour chaque élément de surface à l'intérieur d'une zone de Fresnel. Dans la réalité, la superposition tenant compte de la phase ne se fait pas sur tout le secteur de 180°, mais, en première approximation, seulement sur une portion réduite du secteur. Aussi, dans la majorité des cas, la zone déterminante pour la réflexion n'est-elle pas choisie à une différence de longueur d'onde de  $\lambda/2$  (soit 180°), mais de  $\lambda/4$ .

---

1. Cremer L., Fresnels Methoden zur Berechnung von Beugungsfeldern, Acustica, vol. 72, p.1-6 (1990).