

TABLE DES MATIÈRES

| | | |
|--------|---|----|
| 4.1. | Introduction | 3 |
| 4.2. | Sources de bruit d'un véhicule | 3 |
| 4.2.1. | Moteur | 4 |
| 4.2.2. | Prise d'air, échappement et pot d'échappement | 6 |
| 4.2.3. | Boîte de vitesses et transmission | 6 |
| 4.2.4. | Système de refroidissement | 6 |
| 4.2.5. | Carrosserie | 6 |
| 4.2.6. | Pneus (interaction pneu-revêtement) | 6 |
| 4.3. | Propagation du bruit du trafic en champ libre | 12 |
| 4.3.1. | L_{Aeq} au passage d'un véhicule | 12 |
| 4.3.2. | L_{Aeq} d'un flux de véhicules | 13 |
| 4.3.3. | L_{Aeq} à proximité d'une voie de communication | 14 |
| 4.4. | Propagation du bruit du trafic en terrains autres que dégagés | 16 |
| 4.4.1. | Chaussées avec profil en U | 16 |
| 4.4.2. | Chaussées avec profil en L et autres cas d'espèce | 17 |
| 4.5. | Références | 19 |



4.1. Introduction

La **première partie** de cette fiche est consacrée à l'étude des sources et des mécanismes pertinents qui provoquent ou renforcent le bruit au niveau du véhicule individuel. Diverses composantes d'un véhicule en circulation (moteur, pot d'échappement, pneus...) contribuent de manière plus ou moins significative à la puissance sonore globalement dégagée par celui-ci. On recense ensuite un certain nombre de **phénomènes** (tels l'effet dièdre – ou effet pavillon – entre la bande de roulement du pneu et le revêtement de la chaussée, le phénomène d'adhérence-décollement du caoutchouc sur le revêtement, l'effet de compression-détente de l'air...) qui peuvent influencer la production de bruit. Les **conditions de conduite** (vitesse du véhicule, phase d'accélération ou vitesse constante, choix du rapport de boîte de vitesses, ...) jouent également un rôle dans la production de bruit d'un véhicule.

La **seconde partie** dresse un portrait de la manière dont les niveaux sonores dégagés par les véhicules individuels contribuent au bruit du trafic enregistré dans un environnement proche. Nous verrons comment calculer le niveau de pression acoustique équivalent pour un flux de véhicules circulant sur une voie de communication, et ce pour un observateur se trouvant en bordure de cette voirie. Nous établirons une distinction entre deux cas fondamentaux : d'une part la situation en champ libre, et d'autre part la situation ne répondant pas aux critères d'un champ libre (réverbération du bruit par des bâtiments etc.).

Dans le premier cas, la propagation du bruit du trafic n'est pas influencée par des éléments situés en bordure de voirie. Il apparaîtra ainsi que de nombreux paramètres influencent la production et la transmission du bruit généré par un flux de circulation : citons, entre autres, le type d'écoulement (fluide continu, pulsé continu, pulsé accéléré et pulsé décéléré), la composition du trafic, la pente de la voirie et les conditions atmosphériques telles qu'étudiées dans la fiche 1.

Dans le chapitre où nous traiterons de la situation en milieu bâti, nous aborderons la façon dont le niveau de pression acoustique peut être influencé pour un observateur se trouvant entre la voirie et les éléments réfléchissants. Pour le calcul du niveau de pression acoustique dans le cas où un élément (bâtiment, écran, ...) se trouve placé entre l'observateur et la voirie, nous vous invitons à vous référer aux fiches 10 et 11.

4.2. Sources de bruit d'un véhicule

La figure indique par un schéma les diverses pièces pouvant contribuer à la production de bruit par un véhicule : les pneus (a), la prise d'air et l'échappement d'air (b), le pot d'échappement (c), le bloc moteur (d), la boîte de vitesses et la transmission (e) et le système de refroidissement (ventilateur) (f). La contribution relative de ces différentes sources sonores est en grande partie influencée par le type de véhicule (auto, moto, camion), par l'état mécanique du véhicule (pot d'échappement neuf ou usagé...) et par les conditions de conduite. Le tableau 1 nous donne quelques valeurs chiffrées approximatives de ces contributions – exprimées en pourcentages – pour chacune des sources précitées. Nous établissons ici une distinction entre les voitures et les camions, ainsi qu'entre la conduite en ville (vitesse réduite, accélérations et décélérations fréquentes) et la conduite sur un réseau plus important (vitesses plus élevées et plus constantes).

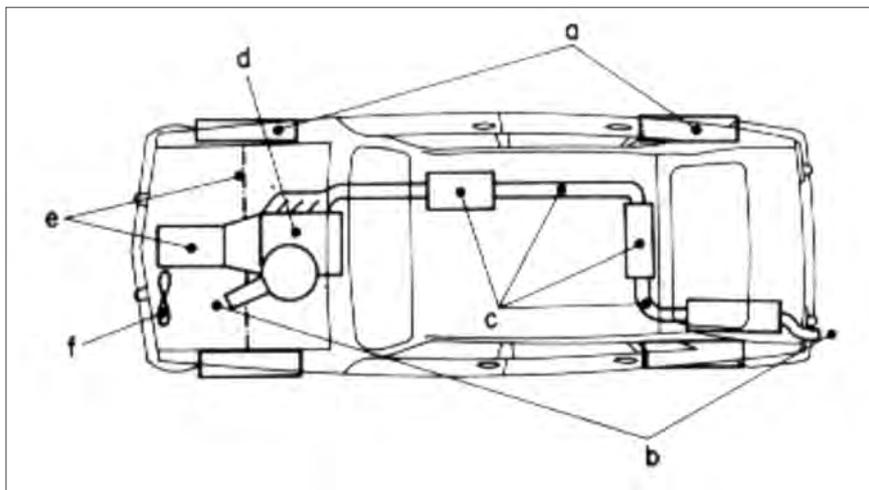


Figure 1 : sources potentielles de bruit dans une voiture de tourisme : pneus (a), prise d'air et échappement (b), pot d'échappement (c), moteur (d), boîte de vitesses et transmission (e) et système de ventilation (f).

| Sources de bruit | Voitures | | Camions | |
|-------------------------------------|----------|---------------|---------|---------------|
| | Ville | Réseau dégagé | Ville | Réseau dégagé |
| Prise d'air, échappement | 15 à 30 | 20 à 70 | 15 à 60 | 40 à 80 |
| Pot d'échappement | 15 à 30 | | | |
| Moteur | 20 à 30 | | | |
| Boîte de vitesses et transmission | 5 à 30 | | 30 à 80 | |
| Système de refroidissement | - | | 10 à 50 | |
| Pneus | 5 à 10 | 30 à 80 | 5 | 20 à 60 |
| Carrosserie (bruits aérodynamiques) | - | - | - | - |

Tableau 1: Contribution (en pour cent) des diverses pièces d'un véhicule au niveau sonore total de celui-ci

Nous allons maintenant examiner, dans la suite de ce chapitre, les différentes sources de bruit détaillées au tableau 1.

4.2.1. Moteur

Le phénomène d'explosion dans les cylindres provoque la vibration de plusieurs pièces du moteur, qui à leur tour vont diffuser le bruit ainsi produit. Le bruit du moteur est principalement et en grande partie répercuté par l'intermédiaire de la chambre de combustion et du carter à huile. La puissance sonore produite par un moteur dépend de son régime (nombre de tours/minute), de sa charge et, dans une moindre mesure, de sa cylindrée.

La charge ne joue pas un rôle capital dans le cas des **moteurs diesel**, sauf si ceux-ci sont à injection indirecte. Pour ce dernier type de moteur, une faible charge peut entraîner une baisse de la puissance sonore de 5 dB. Le niveau de pression acoustique des moteurs diesel¹ augmente beaucoup moins vite que celui des **moteurs à essence**² en cas de hausse de régime. Pour cette dernière catégorie de moteurs, la charge provoque rapidement une augmentation du niveau de pression acoustique de l'ordre de 5 à 6 dB(A). Les moteurs turbodiesel tournent plus vite que les diesels atmosphériques et occupent, en termes de production sonore, une place intermédiaire entre les moteurs diesel "standard" et les moteurs à essence. Lamure utilise les formules suivantes pour exprimer le niveau de pression acoustique des trois types de moteurs à combustion précités :

$$L_{pA, \text{ moteurs diesel}} = 30 \log N + 17,5 \log C + X \quad (\text{équation 1})$$

$$L_{pA, \text{ moteurs turbodiesel}} = 40 \log N + 17,5 \log C + Y \quad (\text{équation 2})$$

$$L_{pA, \text{ moteur à essence}} = 50 \log N + 17,5 \log C + Z \quad (\text{équation 3})$$

où N représente le régime exprimé en tours/minute, C la cylindrée et où X, Y et Z sont des constantes. Ces équations sont représentées sous forme graphique dans la figure 2.

¹ Mesuré sur terrain dégagé à distance fixe de la source de bruit

² ou moteurs au LPG

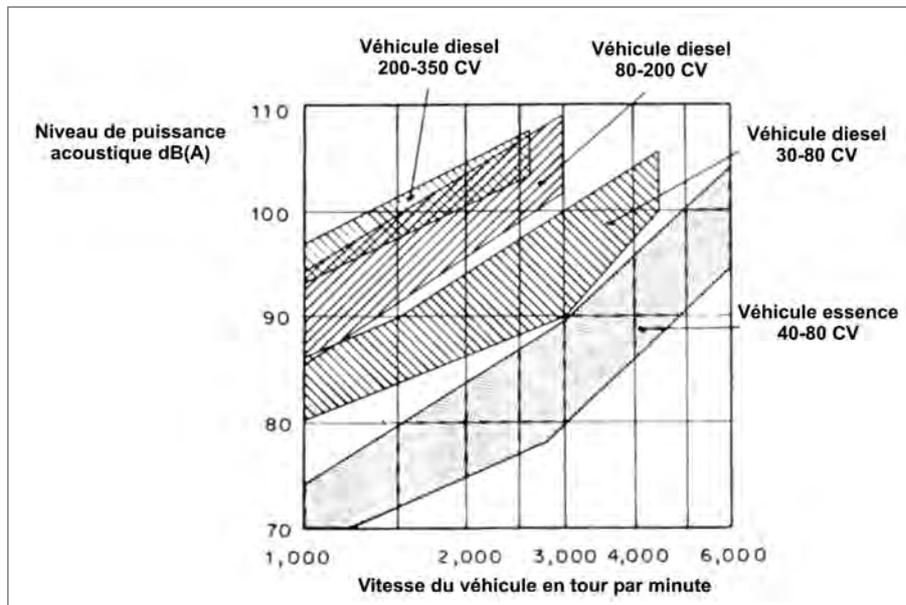


Figure 2 : Niveau de pression acoustique de différents types de moteurs en fonction du régime

On remarquera, pour chacun de ces trois types, qu'un moteur de plus grosse cylindrée produit moins de bruit qu'un moteur de plus petite cylindrée. Un moteur de grosse cylindrée génère une puissance mécanique identique, mais à un régime moins élevé.

Lorsqu'un véhicule **accélère**, on note une augmentation supplémentaire du niveau de pression acoustique par rapport au niveau enregistré pour un véhicule roulant à vitesse constante. Il ressort de l'étude de Lelongⁱⁱⁱ que cet effet est peu prononcé lorsque le véhicule roule à vitesse élevée (donc en quatrième ou en cinquième "vitesse"³) parce que, à vitesse supérieure, c'est le bruit de roulement qui domine. Une hausse significative de la production sonore du moteur se fait sentir lorsque le véhicule circule à vitesse réduite (soit en petites "vitesses") et lorsque l'accélération est supérieure à 1 m/s^2 . On enregistre dans ce cas, pour un véhicule à moteur diesel atmosphérique⁴, une hausse du niveau de pression acoustique de 3 dB(A) et, pour un véhicule turbodiesel⁵, une augmentation pouvant aller jusqu'à 5 dB(A) (figure 3). Lors d'un test effectué sur camionnette⁶, cette augmentation était de l'ordre de 7 dB(A).

Certaines études^{iv} portant sur l'évolution de la production sonore de véhicules neufs en fonction du temps, laissent apparaître que les moteurs diesel des voitures construites durant la dernière décennie étaient nettement plus silencieux que leurs prédécesseurs : réduction de 5 à 8 dB(A) pour la période de 1975 à 1990, et baisse de 3,5 à 6 dB(A) depuis le début des années '90. Remarquons toutefois qu'il est fait mention d'une étude attribuant une baisse bien plus limitée à ce type de moteurs. Quant aux moteurs à essence, ils seraient à peine plus silencieux, voire même légèrement plus bruyants. Ceci est sans doute à mettre sur le compte de l'évolution vers des moteurs plus légers (aluminium) et offrant un régime supérieur pour une petite cylindrée et une puissance mécanique élevée.

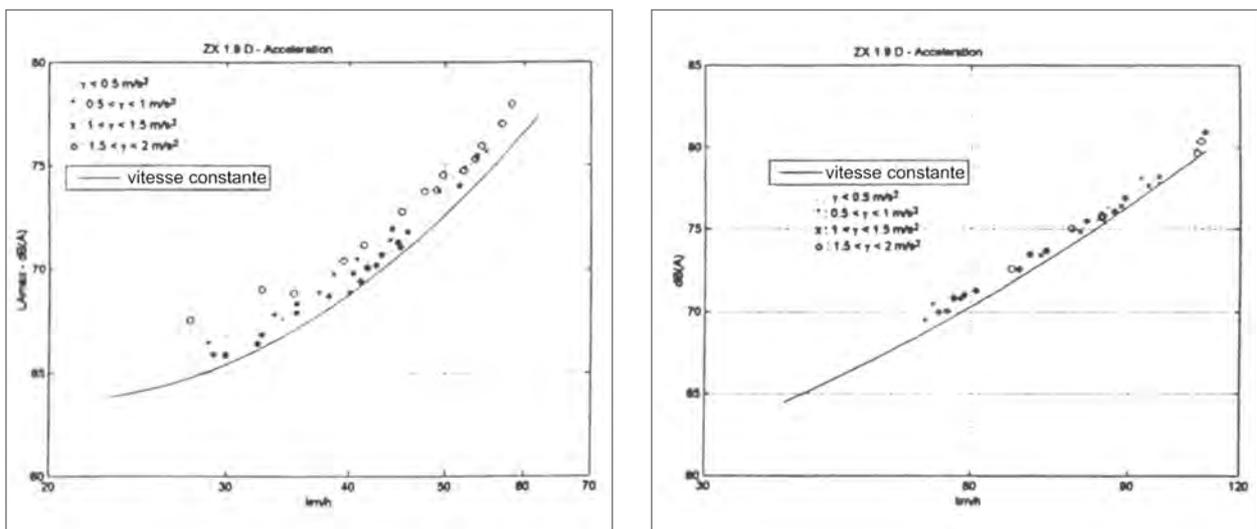


Figure 3 : Effet de l'accélération sur l'émission sonore d'une voiture roulant en 2ème vitesse (gauche) et en 4ème vitesse (droite)

³ "vitesse" faisant ici référence au rapport de boîte de vitesses, et non à la vitesse calculée en termes de km/h. Pour éviter tout risque de confusion, nous mettrons donc, dans le premier cas, le mot "vitesse" entre guillemets.

⁴ Citroën ZX 1.9D

⁵ Ford Mondeo 1.9 TD "

⁶ Ford Transit, type de moteur non spécifié

4.2.2. Prise d'air, échappement et pot d'échappement

C'est surtout dans les années '70-'80 que l'on a commencé à s'intéresser à la réduction des bruits de l'échappement avec, par voie de conséquence, une baisse significative du bruit produit par les pots d'échappements des camionnettes par exemple (voir également⁷). Le problème majeur auquel on se trouve confronté dans le cas présent est d'arriver à atténuer le bruit à basse fréquence car, pour ce faire, des silencieux d'un volume important s'imposent.

4.2.3. Boîte de vitesses et transmission

Bien que Lamure rende la boîte de vitesses et la transmission de certaines voitures responsables d'une part significative de la production de bruit, nous ne disposons à cet égard que de peu de données. Ce bruit pourrait également être dû, en partie, au transfert des vibrations du bloc moteur.

4.2.4. Système de refroidissement

Le ventilateur du système de refroidissement, tournant à grande vitesse, peut intervenir pour 50% de la puissance sonore produite par une camionnette. Cette observation se vérifie particulièrement par temps chaud et lorsqu'on circule au ralenti ou au pas (embouteillages, centre-ville...).

4.2.5. Carrosserie

Les bruits **aérodynamiques** dus aux turbulences de l'air autour de la carrosserie semblent n'être significatifs qu'en cas de vitesses élevées (200 à 300 km/h), comme l'indiquent des études réalisées il y a quelques dizaines d'années⁸. Les fabricants n'ayant cessé, depuis, d'améliorer la qualité aérodynamique des carrosseries dans le but de réduire la consommation de carburant, nous pouvons faire abstraction de cette source de bruit dans le contexte qui nous préoccupe.

C'est principalement sur les camions – avec benne basculante par exemple – que la carrosserie propage les bruits, en raison des vibrations qui sont provoquées par les irrégularités de surface de la voirie et qui se transmettent au véhicule. Ce phénomène se manifeste en cas d'irrégularités comprises entre 0,5 mm et 50 m (ces irrégularités de surface sont définies plus en détail ci-après).

4.2.6. Pneus (interaction pneu-revêtement)

Les sources de bruit que nous avons observées jusqu'à présent sont prépondérantes en cas de **vitesse réduite**⁷. En cas de **vitesse plus élevée**, le bruit des pneus prédomine. Outre les caractéristiques propres aux pneumatiques du véhicule, il convient également d'examiner les **caractéristiques du revêtement de surface de la chaussée**, et principalement la texture de ce revêtement, laquelle s'avère déterminante pour le bruit produit par les pneus.

On entend par **texture** du revêtement, les irrégularités de surface que présente un revêtement, dont la dimension horizontale peut varier de quelques fractions de millimètre à 0,5 mètre. Globalement, ces irrégularités se classent en quatre catégories selon leur dimension horizontale, également appelée "longueur d'onde" (figure 4).

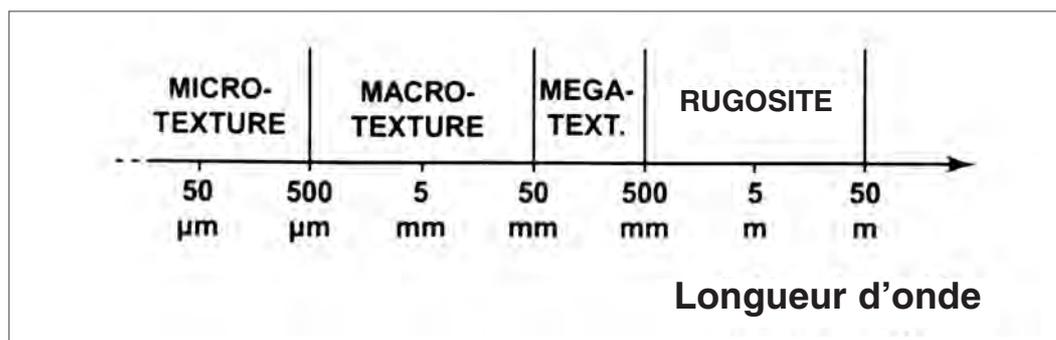


Figure 4: Les différentes classes de textures d'un revêtement en fonction de leur longueur d'onde

⁷ jusqu'à env. 50 km/h pour les voitures, et jusqu'à env. 80 km/h pour les camions

Les très petites aspérités – inférieures à 0,5 mm – appartiennent à la **microtexture**, tandis que les irrégularités comprises entre 0,5 et 50 mm sont désignées sous le terme de **macrotexture**. La **mégatexture** regroupe, quant à elle, les **irrégularités** du revêtement dont les dimensions sont comprises entre 5 cm (soit environ la dimension correspondant à la pression du pneu sur le revêtement) et 50 cm. On désigne sous le terme d'irrégularité les déformations dont la longueur d'onde se situe entre 50 cm et 50 m. Le rapport entre la taille du pneumatique et les différentes classes de textures est représenté schématiquement à la figure 5. Dans le cadre de notre réflexion sur le bruit produit par les pneus d'un véhicule, ce sont principalement la mégatexture et la macrotexture qui retiennent notre attention.

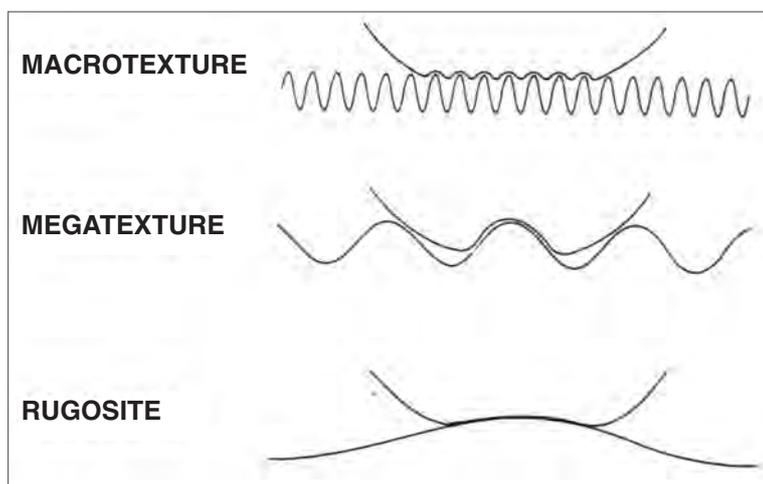


Figure 5 : Rapport entre la taille du pneu et les différentes formes de texture

Les mécanismes qui régissent le bruit des pneus, les effets qui le renforcent et les paramètres pertinents en la matière sont assez bien connus. Ces mécanismes sont les suivants :

1. le bruit produit par le pneumatique provient en grande partie de la **vibration du pneu**. Ces vibrations sont principalement provoquées par la mégastucture du revêtement de la chaussée. Plus la mégastucture est importante, plus il y a de vibrations et plus le bruit qui en résulte est puissant. Lorsque le pneu roule sur ces irrégularités, sa surface de contact est soumise à ce que l'on pourrait appeler une succession de chocs, comme si quelqu'un frappait sur le pneu avec un marteau, à un rythme très rapide. Des vibrations apparaissent sur la surface de roulement du pneu mais aussi sur les faces latérales; le bruit est donc essentiellement produit au niveau du quart inférieur du pneu. Il s'agit surtout de sons dont la fréquence est inférieure à 1000 Hz, bien qu'une étude récente indique que la production à plus haute fréquence est souvent plus importante que ce que l'on admettait il y a peu^{vi}.
2. le processus **d'adhérence et de glissement** du caoutchouc de la semelle du pneu sur le revêtement de la chaussée. Ce mécanisme engendre des forces tangentielles qui s'exercent sur la bande de roulement du pneu et provoquent une vibration des nervures (figure 6), aussi bien dans le sens tangentiel que dans le sens radial, provoquant ainsi le "cristement" haute fréquence caractéristique des pneus. Ce même phénomène se manifeste également de façon très prononcée à faible vitesse, lorsque le véhicule roule sur une surface bétonnée lisse et polie, comme on en trouve entre autres dans certains parkings souterrains de grandes surfaces. Dans ce cas, le phénomène se produit principalement en cas d'accélération ou de freinage, ou encore dans les tournants.

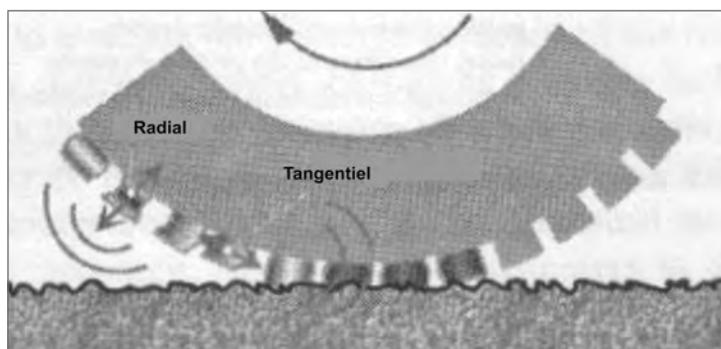


Figure 6: Le phénomène d'adhérence et de glissement du dessin en caoutchouc du pneumatique sur le revêtement de la chaussée engendre des vibrations tangentielles et radiales, provoquant le "cristement" caractéristique du pneu

3. très proche du phénomène d'adhérence-glisserment^{vii}, nous avons le phénomène d'adhérence-décollement qui se manifeste par une adhérence accrue entre le pneu et le revêtement de la chaussée, par exemple lorsqu'on roule en plein été avec des pneus neige à gomme souple sur une chaussée plane, ce qui provoque une augmentation de l'excitation tangentielle du dessin du pneumatique.
4. le phénomène "d'air-pumping" ou de compression-détente de l'air: lorsqu'un pneumatique roule sur une surface, l'air se trouve comprimé de manière répétitive dans les cavités du pneumatique et de la chaussée avant d'être instantanément expulsé (figure 7).

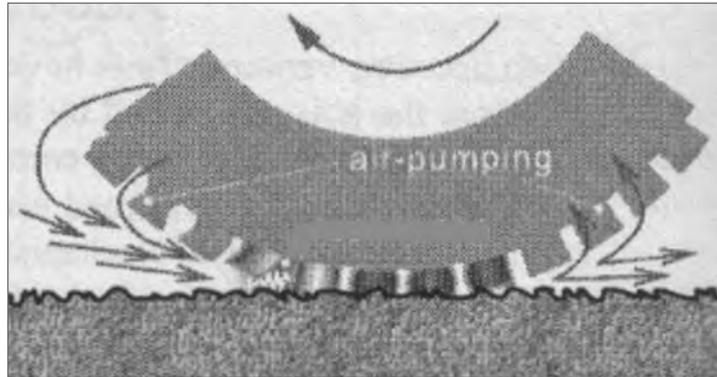


Figure 7: Le dessin du pneumatique emprisonne et comprime de l'air avant de le relâcher. Il s'agit du phénomène "d'air-pumping" ou de compression-détente de l'air.

L'air, au moment où il s'échappe, génère un bruit dont la fréquence se situe généralement au-delà des 1000 Hz. Le bruit peut être amplifié par les réverbérations du son dans les cavités du dessin du pneumatique. L'aspiration de l'air représente une large part du bruit globalement généré par les pneumatiques. L'effet est optimal sur les types de chaussées uniformément lisses, l'air étant dans ce cas emprisonné de manière particulièrement efficace. L'effet est par contre insignifiant sur les surfaces présentant une forte macrotexture⁸ ou sur les surfaces poreuses : au lieu d'être comprimé, l'air peut s'échapper verticalement via les pores du revêtement de la chaussée. Si le revêtement possède une macrostructure prononcée, l'évacuation se fera plutôt horizontalement. Les pneus sont actuellement conçus pour éviter au maximum cet emprisonnement de l'air dans les cavités temporairement hermétiques entre la surface de roulement du pneumatique et la chaussée, ce qui permet ainsi de prévenir le phénomène de compression-détente^{viii}.

Les mécanismes d'adhérence-glisserment, d'adhérence-décollement et de compression-détente génèrent un bruit dont les fréquences se situent généralement entre 1000 et 1500 Hz.

5. Le bruit occasionné par ces quatre mécanismes peut être amplifié par ce que l'on appelle l'effet dièdre ou **effet pavillon**. Il se crée, entre la surface de roulement du pneumatique et la chaussée, un espace cunéiforme. Le bruit généré dans l'aire de contact pneumatique/chaussée peut être réfléchi plusieurs fois entre la bande de roulement du pneu et la chaussée et être ainsi amplifié, tout comme la voix humaine se trouve amplifiée grâce au pavillon du porte-voix (figure 8). Étant donné que la surface de roulement du pneumatique présente un faible coefficient d'absorption, l'effet dièdre est considérable lorsque la surface de la chaussée est, elle aussi, peu absorbante sur le plan acoustique. Il est toutefois possible de neutraliser en grande partie cet effet dièdre lorsque la chaussée, grâce à la mise en œuvre d'un asphalté anti-bruit, garantit une absorption acoustique pour le niveau de fréquence souhaité.

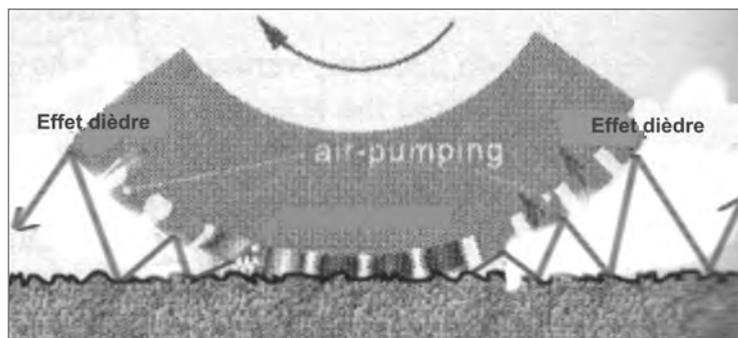


Figure 8: Le bruit généré près de la surface de roulement du pneumatique peut être amplifié par de multiples réverbérations entre la semelle du pneu et la chaussée.

⁸ irrégularités du revêtement de la chaussée dont les dimensions sont comprises entre 50 mm et 0,5 m

En cas d'interaction pneumatique/chaussée, tant les caractéristiques du pneumatique que celle de la chaussée ont un rôle à jouer. Les paramètres déterminants pour le **pneu** sont les suivants :

1. la **rigidité** du pneu : plus le pneu est rigide, plus la production de bruit due aux vibrations est élevée. Une rigidité suffisante du pneu s'avère néanmoins utile pour lui assurer d'autres qualités : une bonne tenue de route, une bonne maniabilité, une faible consommation du véhicule en carburant etc. Les fabricants de pneumatiques doivent donc toujours rechercher le compromis. C'est pourquoi, dans la pratique, les modèles de pneumatiques n'ont quasiment pas évolué depuis les années 1920 sur le plan de leur qualité sonore (figure 9⁹)

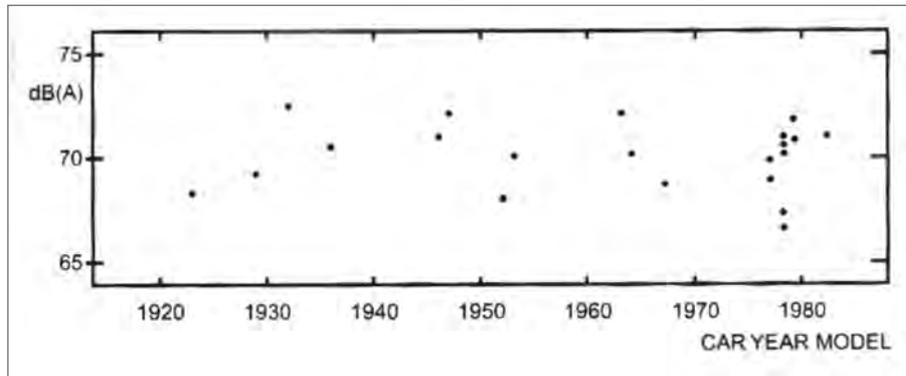


Figure 9: Les pneumatiques développés depuis 1920 n'ont quasiment pas évolué sur le plan de leur qualité sonore

2. la **géométrie** du pneu et plus particulièrement sa largeur constituent deux facteurs importants. Phillips^x a démontré que, pour chaque centimètre gagné en largeur, le niveau de pression acoustique produit⁹ augmente de 0,3 dB(A). Cette donnée n'est pas dépourvue d'importance eu égard au constat selon lequel les nouveaux modèles de voitures présentent des pneumatiques de plus en plus larges (augmentation moyenne de 2,08 cm tous les 10 ans, selon le même auteur). Un autre aspect capital est le dessin du pneu, qui doit impérativement être **irrégulier**. Les pneus mal étudiés et présentant un dessin régulier donnent naissance à des éléments tonaux dans le spectre du bruit des pneus (figure 10); le bruit émis peut dès lors s'avérer plus incommode pour les personnes qui y sont exposées (voir fiche 2).

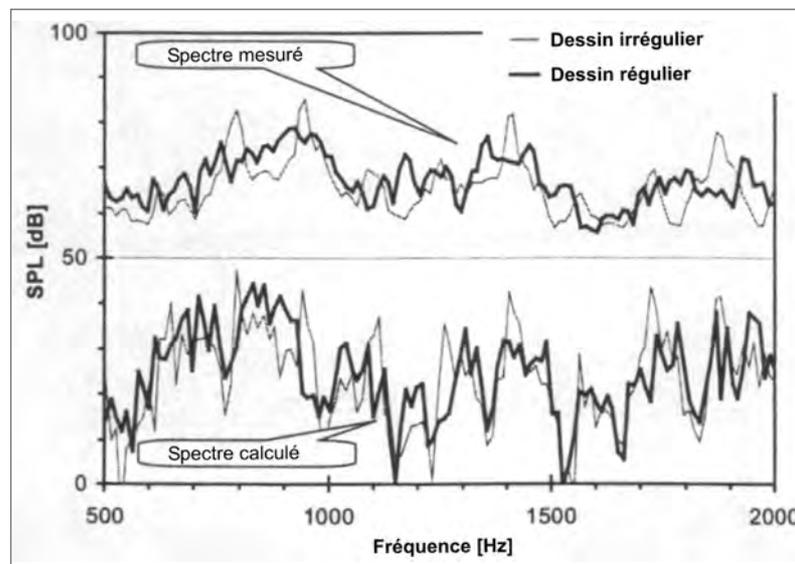


Figure 10 : Spectre d'un pneu présentant un dessin régulier (tracé épais) et un dessin irrégulier (tracé fin). On constate, pour le pneu avec dessin régulier, la présence d'éléments tonaux dans le spectre (à 800, 1000, 1400 et 1900 Hz), qui rendent le bruit plus incommode que celui émis par un pneu avec dessin aléatoire.

3. la **pression du pneu** et la **charge du pneu** influencent la rigidité du pneumatique et, par voie de conséquence, le niveau de pression acoustique produit^v. La vitesse de rotation du pneu est un paramètre encore plus important; elle est étroitement liée à la **vitesse du véhicule** (v).

⁹ mesuré en termes de L_{Amax} à une distance de 7,5 m par rapport au centre de la chaussée suivant la méthode "Statistique au passage" (méthode SPB - "Statistical Pass-by") (voir ISO 11819 (1997))

Le niveau de pression acoustique, tel que produit par les pneumatiques d'un véhicule déterminé, est directement proportionnel au logarithme de la vitesse du véhicule :

$$L_{pA, \text{pneus}} = a + b \cdot \log(v) \quad (\text{équation 4})$$

où les constantes a et b sont fonction du véhicule et de ses pneumatiques, ainsi que du type de revêtement de la chaussée. La figure 11 illustre les résultats des mesures du niveau de pression acoustique maximal L_{Amax} , enregistrées à 7,5 m du milieu de la chaussée lors du passage d'un véhicule dont on avait coupé le moteur afin que seul le bruit des pneumatiques puisse être mesuré. Les mesures ont été effectuées à différentes vitesses; le test était réalisé avec un type de voiture de tourisme^{xi} et deux types de camions **sur béton bitumineux dense (voir fiche 7)**. On dénote un rapport linéaire entre L_{Amax} et $\log(v)$. L'inclinaison de la droite b et de l'offset a est différente pour les trois véhicules.

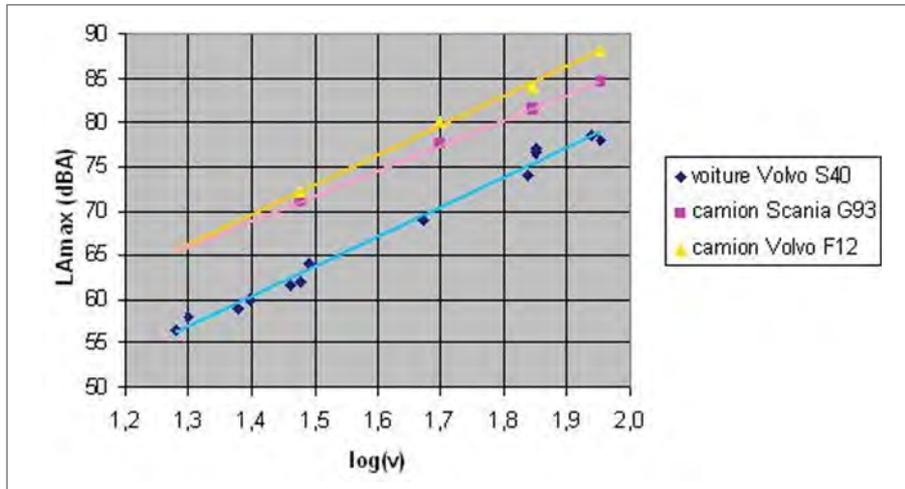


Figure 11: Niveau de pression acoustique maximal correspondant à trois types de véhicules circulant moteur coupé, mesuré à 7,5 m du centre de la chaussée et à différentes vitesses. On constate clairement le rapport linéaire entre L_{Amax} et le logarithme de la vitesse.

Les paramètres du **revêtement de chaussée** qui en déterminent le niveau de bruit sont les suivants :

1. la **texture** du revêtement de chaussée. Comme nous l'avons dit précédemment, la mégatexture est en grande partie responsable des vibrations du pneu et doit donc être évitée. La macrotexture combat l'effet d'aspiration de l'air et s'avère donc plus propice d'un point de vue acoustique.
2. le **pourcentage d'espaces creux** dans le revêtement de chaussée, la **porosité** du revêtement, sont des facteurs présentant une linéarité par rapport au coefficient d'absorption (figure 12). Une forte absorption acoustique permet de réduire l'effet dièdre cité plus haut ainsi que le phénomène de compression-détente de l'air. D'autre part, un pourcentage trop élevé de cavités dans le revêtement de chaussée influence négativement la stabilité et, par conséquent, la durabilité.

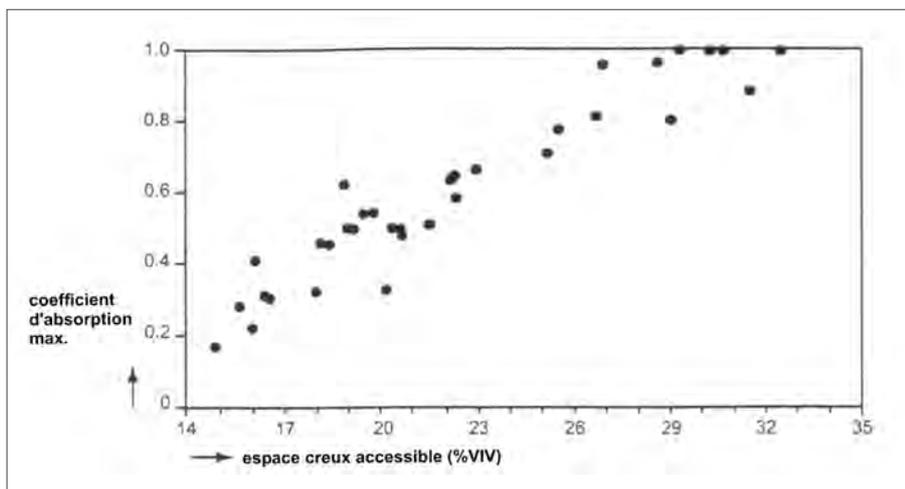


Figure 12: Un pourcentage élevé d'espaces creux non hermétiques garantit un meilleur coefficient d'absorption et, de ce fait, une diminution de l'effet dièdre.

3. la présence d'eau sur la chaussée est un autre paramètre qui peut influencer la production de bruit. C'est ce paramètre qui détermine le crépitement caractéristique haute fréquence que l'on entend par temps humide. La présence d'un film d'eau sur la chaussée peut engendrer une hausse significative du bruit produit, en raison de la formation de gouttelettes d'eau et de leur projection lorsque les véhicules roulent à vitesse élevée. Des études laissent apparaître que l'augmentation du niveau de pression acoustique se situe essentiellement au-delà des 1000 Hz^{xiii} et que l'épaisseur du film d'eau ne joue qu'un rôle minime, sauf lorsqu'il est totalement évacué en cas de revêtement drainant. L'amplification du bruit semble être plus importante à vitesse réduite qu'à grande vitesse.^{xiii}
4. la **rigidité** du revêtement de surface devrait se classer en seconde place parmi les facteurs déterminants du bruit : plus un revêtement est rigide, plus il est bruyant. On pourrait ainsi obtenir un résultat spectaculaire si l'élasticité du revêtement de la chaussée était du même ordre de grandeur que l'élasticité de la gomme des pneumatiques. Des programmes d'études sur le sujet sont en cours depuis de nombreuses années, principalement en Suède, en Norvège et au Japon^{xiv}. Bien que les mesures du bruit sur surfaces "poroélastiques"^{xv} aient déjà prouvé de réelles possibilités sur le plan d'une diminution du bruit du trafic, il reste toutefois, dans la pratique, quelques problèmes à résoudre pour ce type de revêtement (entre autres au niveau de la durabilité, des qualités ignifuges, du frottement etc.).

Pour obtenir des informations plus circonstanciées sur les différents types de revêtements de chaussées et sur leurs propriétés respectives, nous vous invitons à vous référer à la fiche 7.

Lorsque l'échantillon regroupe un grand nombre de véhicules circulant sur un type précis de chaussée à vitesse déterminée, on constate un certain écart dans les niveaux SPB¹¹ mesurés; celui-ci provient des différences enregistrées sur le plan des diverses sources de bruit des véhicules, telles que nous les avons analysées précédemment. Il est toutefois possible de calculer une valeur moyenne et, en répétant cette procédure, de dégager un rapport linéaire entre le logarithme de la vitesse du véhicule et le L_{Amax} moyen mesuré suivant la méthode SPB. Dans la Nederlandse Standaard Rekenmethode^{xv}, on prend également comme hypothèse de départ le rapport suivant entre le niveau SPB et $\log(v)$, où le béton bitumineux dense est considéré comme revêtement de référence :

$$L_{Amax, \text{ moyenne sur béton bitumineux dense}} = a + b \cdot \log(v/v_0) \quad (\text{équation 5})$$

Les constantes a et b correspondent, **pour les véhicules légers**, à :

$$a = 74,8 ; b = 33,0 \text{ en } v_0 = 80 \text{ km/heure (vitesse de référence)}$$

et pour les **véhicules lourds** à :

$$a = 83,5 ; b = 22,8 \text{ en } v_0 = 70 \text{ km/heure (vitesse de référence)}$$

Ce rapport entre L_{Amax} et la vitesse v est illustré sous forme de graphique dans la figure 13.

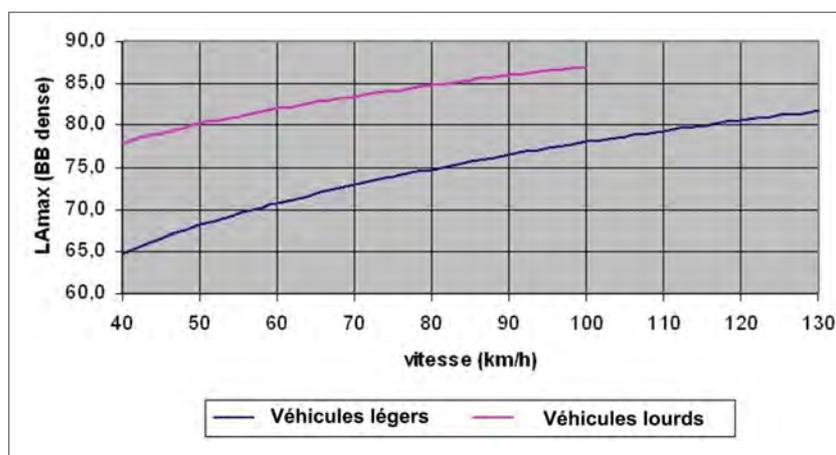


Figure 13: Bruit total émis par un véhicule, pour les voitures de tourisme et les camions, en fonction de la vitesse du véhicule et suivant la méthode de calcul néerlandaise SRM.

¹⁰ poreux + élastique

¹¹ méthode normative de mesure internationale permettant d'analyser les qualités acoustiques d'un revêtement de chaussée déterminé. On mesure pour ce faire le niveau de pression acoustique maximal des véhicules venant à passer sur la chaussée; la mesure s'effectue à une distance de 7,5 m par rapport à l'axe du tronçon routier. On définit ainsi un échantillon d'au moins 100 voitures et d'au moins 80 camions (dont au moins 30 double essieux et au moins 30 multi-essieux). La qualité acoustique du revêtement observé est exprimée sous forme d'un indice SPB, calculé sur base des niveaux de pression acoustique maximaux moyens. Voir à ce sujet la norme internationale ISO 11819.

4.3. Propagation du bruit du trafic en champ libre

Nous allons d'abord nous intéresser, dans le présent chapitre, à la manière dont le niveau de pression acoustique équivalent peut être calculé par un observateur se trouvant à une certaine distance d'une chaussée sur laquelle circule un véhicule ou un flux de véhicules, en fonction de la puissance sonore dégagée par les véhicules. Nous proposerons ensuite une formule simple et pratique qui nous permettra d'évaluer le niveau de pression acoustique équivalent à une distance donnée de la chaussée, et ce dans le cas où il n'y aurait aucun apport significatif en termes de réverbération du bruit du trafic à l'endroit où se trouve le poste d'observation (champ libre). Pour ce faire, nous tiendrons compte des facteurs influençant la production et la propagation du bruit du trafic que nous avons analysés dans les chapitres précédents. Dans le chapitre suivant, nous aborderons le cas où les réverbérations du bruit du trafic ne peuvent être négligées (terrain non dégagé). Les formules utilisées offrent l'avantage de pouvoir évaluer le niveau de pression acoustique à l'aide d'un calcul relativement simple qui peut être effectué sur une simple calculatrice de poche. Il est alors possible, sur cette base, de **calculer en premier lieu la valeur approchée** du niveau de pression acoustique équivalent réel. Nous pouvons également obtenir une évaluation plus précise par le biais d'une méthode de calcul plus sophistiquée (comme la méthode néerlandaise SRM II ou les autres méthodes de calcul énumérées dans la fiche 1). Ces méthodes exigent quant à elles un logiciel spécialisé pour PC, disponible sur le marché.

Nous avons donc envisagé, jusqu'à présent, la production sonore de véhicules individuels (ou de parties de ces véhicules) en termes de niveau de puissance acoustique pondéré A (L_{PA}), ou de niveau de pression acoustique maximal pondéré A (L_{Amax}), mesurés suivant la norme ISO appropriée¹² au passage d'un véhicule et à une distance de 7,5 m. Ces deux grandeurs sont liées l'une à l'autre de manière assez simple si l'on considère le véhicule se trouvant à cette distance comme étant une source ponctuelle¹³ et le sol entourant ce véhicule comme étant parfaitement réverbérant :

$$L_{Amax}(à\ 7,5\ m) = L_{PA} - 10 \log (2\pi (7,5)^2) = L_{PA} - 25,5 \quad (\text{équation } 6)$$

Dans la pratique, notre objectif est de pouvoir apprécier l'ambiance acoustique au moyen d'un des paramètres d'évaluation mentionnés à la fiche 1 (essentiellement L_{Aeq} ou un de ses paramètres dérivés) que nous aimerions connaître pour plusieurs points d'émission à proximité d'une voirie.

Comment calculer le niveau de pression acoustique équivalent pour un point d'émission à proximité d'une voirie, lorsque le bruit peut se propager en champ libre, c'est-à-dire sans que sa propagation soit influencée par des obstacles réverbérants ?

4.3.1. L_{Aeq} au passage d'un véhicule

Considérons un véhicule roulant à une vitesse constante v ¹⁴ sur un tronçon rectiligne (figure 14).

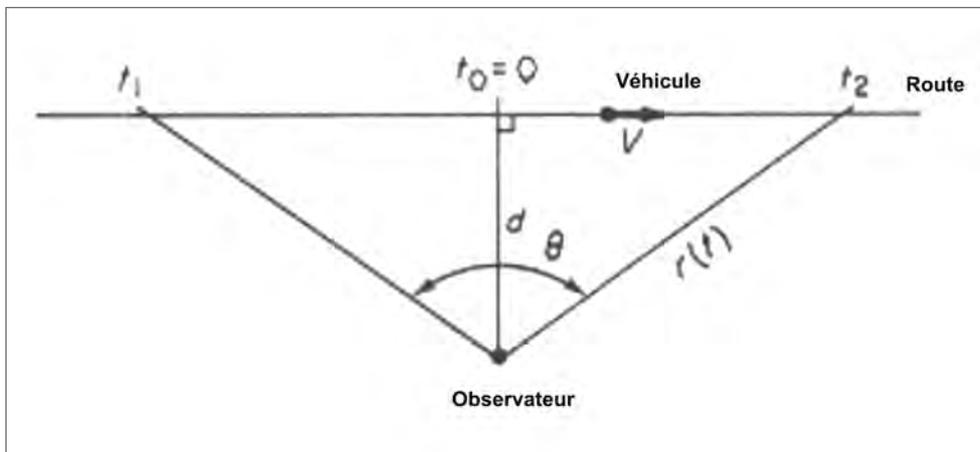


Figure 14 : Représentation schématique d'un observateur situé à distance d d'un tronçon rectiligne sur lequel un véhicule se déplace à vitesse constante v

¹² ISO 11819

¹³ il a été démontré par le biais d'une analyse d'intensité qu'un véhicule à cette distance et en bonne phase d'approche peut être considéré comme une source ponctuelle qui se trouve sur l'axe longitudinal du véhicule, à environ 4 cm au-dessus de la chaussée (voir référencev)

¹⁴ exprimée en m/s

Partons du principe que la puissance acoustique (avec son niveau de puissance L_{PA} correspondant) est constante et que cette puissance rayonne uniformément dans toutes les directions. Un observateur se trouvant à une distance d de la chaussée effectue sa première mesure du L_{Aeq} à un moment t_1 (lorsque le véhicule se trouve au point x) et sa dernière mesure à un moment t_2 (lorsque le véhicule se trouve au point y). L'observateur perçoit le tronçon x - y sous un angle α^{15} ; la distance entre l'observateur et la chaussée est égale à d^{16} . Il nous est ainsi permis d'établir^{xvi} que le niveau de pression acoustique équivalent L_{Aeq} , mesuré sur l'intervalle t_2 - t_1 , s'exprime comme suit¹⁷ :

$$L_{Aeq, t_2-t_1} = L_{PA} - 10 \log (t_2 - t_1) - 10 \log (d.v) + 10 \log (\alpha/2\pi) \quad (\text{équation 7})$$

On peut donc en conclure :

- ◆ que le L_{Aeq} augmente de $10 \log (\alpha)$, où α représente l'angle sous lequel l'observateur perçoit le tronçon de voirie;
- ◆ que le L_{Aeq} diminue de $10 \log (d)$; un doublement de la distance entre l'observateur et la voirie entraîne une baisse de 3 dB(A)
- ◆ que si la puissance acoustique du véhicule est indépendante de la vitesse (ce qui n'est généralement pas le cas), le L_{Aeq} diminue lorsque la vitesse augmente de l'ordre de $10 \log (v)$. Ceci provient du fait que l'observateur est exposé au bruit de la source pendant une durée moins longue lorsque la vitesse est plus élevée. Dans la pratique, le L_{PA} augmente **lorsque** la vitesse s'accroît de l'ordre de $\approx 30 \log (v)^{18}$, de sorte que le L_{Aeq} augmente avec la vitesse de l'ordre de $20 \log (v)$

4.3.2. L_{Aeq} d'un flux de véhicules

Si Q représente le débit¹⁹ d'un flux de véhicules identiques (ayant tous une puissance acoustique L_{PA}) circulant sur un tronçon de voirie à une vitesse v , il est alors possible de déterminer que le niveau de pression acoustique équivalent L_{Aeq} enregistré par un observateur s'exprime comme suit :

$$L_{Aeq} = L_{PA} + 10 \log (Q) - 10 \log (v.d) + 10 \log (\alpha/2\pi) \quad (\text{équation 8})$$

où d et α représentent respectivement, comme précédemment, la distance à laquelle se trouve l'observateur par rapport à la voirie et l'angle sous lequel l'observateur perçoit le tronçon de voirie, et où v représente la vitesse des véhicules en m/s.

Remarquons que L_{Aeq} , en cas de flux de circulation stable, est indépendant du temps mesuré et augmente avec le débit du flux de circulation de $10 \log (Q)$. Si on multiplie le nombre de véhicules par deux, on obtient une hausse de 3 dB(A) et si on multiplie le débit de véhicules par dix, on obtient une hausse de 10 dB(A).

Lorsque Q est exprimé en véhicules/heure, la vitesse en km/heure et lorsque α est assimilé à π , ce rapport peut également être exprimé comme suit :

$$L_{Aeq} = L_{PA} + 10 \log (Q) - 10 \log (v.d) - 33 \quad (\text{équation 9})$$

Si, comme c'est le cas dans la pratique, nous ne sommes pas en présence de véhicules identiques, les équations 8 et 9 restent valables, à condition cependant que la puissance acoustique du véhicule individuel L_{PA} soit remplacée par la puissance "moyenne logarithmique" du véhicule, $\langle L_{PA} \rangle$, calculée comme suit :

$$\langle L_{PA} \rangle = 10 \log ((1/n \sum P_{Ai})/P_0) \quad (\text{équation 10})$$

où P_{Ai} représente la puissance acoustique pondérée A du véhicule individuel, n le nombre de véhicules de l'échantillon et P_0 le niveau de puissance acoustique de référence (voir équation 13 de la fiche 1).

¹⁵ exprimé en radians

¹⁶ exprimée en m

¹⁷ uniquement en terrain dégagé

¹⁸ pour les véhicules légers, voir équation 5

¹⁹ exprimé en nombre de véhicules/seconde

4.3.3. L_{Aeq} à proximité d'une voie de communication

L'énergie acoustique **produite** par le trafic d'une voie de communication se définit principalement par :

- ◆ le débit de véhicules
- ◆ la vitesse des véhicules
- ◆ le régime de conduite du flux de véhicules (vitesse continue, accélération, décélération, par à-coups)
- ◆ le revêtement de la chaussée (principalement la macrotexture et la mégatexture et la présence / l'absence d'irrégularités)
- ◆ le pourcentage de véhicules lourds
- ◆ la pente de la chaussée, exprimée en pour cent

Il convient néanmoins de préciser que le niveau de pression acoustique généré par une voie de communication n'est pas uniquement tributaire de chacun de ces facteurs pris individuellement, mais qu'il résulte souvent d'une combinaison de deux facteurs ou plus (par exemple le pourcentage de véhicules lourds et la pente de la chaussée).

La **propagation** du bruit dans l'environnement immédiat est déterminée par :

- ◆ les conditions atmosphériques (essentiellement la direction et la vitesse du vent)
- ◆ les éléments de protection (écrans acoustiques, rangées de maisons, talus, couverture...)
- ◆ la végétation et l'absorption de l'air
- ◆ la hauteur de la chaussée par rapport au niveau du sol

Tous les véhicules ne roulent pas à la même **vitesse**. La limitation de vitesse ainsi que le taux de saturation de la voie de communication conditionnent l'échelonnement des vitesses. La production de bruit d'une voie de communication est régie par les véhicules les plus rapides. Lamureⁱ définit la vitesse du flux de circulation comme étant la vitesse dépassée par 15% des véhicules.

Le régime de conduite d'un flux de circulation peut lui aussi jouer un rôle. On distingue ainsi quatre régimes de conduite : continu, accélération, décélération et par à-coups (= succession d'accélération et de décélération). Il apparaît que l'accélération et la conduite par à-coups engendrent des niveaux de pression acoustique plus élevés que la décélération. Cette augmentation se marque davantage en situation de vitesse réduite, et diminue lorsque les vitesses sont plus élevées (voir également 4.2.1). Les mesures du niveau de pression acoustique équivalent aux points situés le long d'une voie de communication à différentes distances d'un endroit où la circulation se trouve à l'arrêt^{xvii}, montrent des hausses de 2,5, 3,5 et 2 dB(A) pour les voitures, les camions légers et les poids-lourds en phase d'accélération, et ce à une vitesse de 49 km/h. A une vitesse de 97 km/h, on n'enregistre plus aucune augmentation.

Pour tenir compte de l'influence du pourcentage des **véhicules lourds** dans un flux de circulation, Lamure a introduit le facteur E, à savoir le rapport entre la puissance acoustique rayonnée d'un véhicule lourd et celle d'un véhicule léger. Ce rapport est lié à la vitesse et à la **pente de la chaussée**. Quelques données relatives à cet aspect sont communiquées au tableau 2.

| Type d'artère | $r \leq 2\%$ | $r = 3\%$ | $r = 4\%$ | $r = 5\%$ | $r \geq 6\%$ |
|---|--------------|-----------|-----------|-----------|--------------|
| Autoroute ($v \approx 120$ km/h) | 4 | 5 | 5 | 6 | 6 |
| Voie rapide en ville ($v \approx 90$ km/h) | 7 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| Chaussée en ville ($v \approx 60$ km/h) | 10 | 13 | 16 | 18 | 20 |

Tableau 2.: Rapport E entre la puissance acoustique d'un véhicule lourd et la puissance acoustique d'un véhicule léger pour quelques types de voiries et pour quelques types de pentes (en degrés - r)

Ces chiffres nous indiquent que, sur une voie rapide plane, un véhicule lourd produit un bruit équivalent à celui de quatre voitures, tandis que sur une chaussée en forte pente, un camion génère un bruit équivalent à celui de vingt voitures.

La pente de la voirie exerce donc une influence considérable sur la production de bruit des véhicules lourds, mais beaucoup moins sur la production de bruit des voitures de tourisme. Le fait de devoir monter une pente génère un supplément de bruit au niveau du moteur. Pour les voitures de tourisme, le bruit du moteur est couvert par le bruit des pneus lorsque le véhicule roule à vitesse réduite. Certains modèles de calcul tiennent compte néanmoins d'une correction pour la pente de la voirie. Dans le cas du calcul SRM I, il est tenu compte d'une correction de 1, 2 et 3 dB(A) pour, respectivement, les pourcentages de pentes de 3 à 5%, de 5 à 8% et de plus de 8%. Le modèle de calcul français (voir référence²⁰) propose quant à lui des corrections qui semblent assez excessives (jusqu'à 7,5 dB(A) pour les voitures de tourisme).

L'absorption de l'air est assez limitée et doit être totalement négligée à courte distance; on peut par contre en tenir compte, si on le souhaite, pour les valeurs chiffrées communiquées au chapitre 1.13.3. Lors du calcul des niveaux de pression acoustique, on part de l'hypothèse où l'atmosphère est stable (c'est-à-dire où les effets du vent et des températures sont à dédaigner). Le cas échéant, on peut appliquer une atténuation complémentaire pour la végétation (voir chapitre 1.13.4) et/ou les écrans (voir fiche 11).

Les **influences du sol** peuvent susciter une atténuation des ondes sonores qui n'est pas à négliger. Pour en tenir compte dans l'évaluation, on remplace une fois encore la dépendance de la distance $\log(d)$, qui correspond à une baisse du niveau de pression acoustique de 3 dB(A) chaque fois que la distance est multipliée par deux, par une dépendance $13 \log(d)$. Ceci correspond à une diminution de 4 dB(A) chaque fois que la distance est multipliée par deux. Dans le cas présent, la diminution de 1dB(a) supplémentaire pour chaque redoublement de la distance représente une sorte de contribution "forfaitaire" pour l'influence du sol.

En ce qui concerne l'influence des **éléments de protection**, nous vous invitons à vous référer à la fiche 11.

Le bruit des voies de communication où le niveau du revêtement se trouve plus bas que le niveau du sol, est en partie masqué par les talus formant parois, ce qui génère bien entendu un effet positif. L'aspect quantitatif de ce paramètre est également analysé à la fiche 11. Lorsque le revêtement de la chaussée se trouve surélevé par rapport au niveau du sol, l'action protectrice des éventuels éléments de protection diminue, tout comme l'absorption par le sol. Dans ce cas, le bruit se diffuse plus efficacement dans l'environnement immédiat, d'où une situation de nouveau moins favorable. La hauteur à laquelle se trouve le revêtement par rapport au niveau du sol doit sans aucun doute entrer en ligne de compte dans les programmes de calcul sophistiqués visant à évaluer le niveau de pression acoustique dans l'environnement d'une voie de communication.

Lorsque nous combinons les équations 5 et 6, nous voyons que la puissance acoustique moyenne des voitures peut être exprimée comme suit :

$$\langle L_{PA, \text{voitures}} \rangle = 37,5 + 33 \log(v) \quad (\text{équation 11})$$

Considérant les équations 9 et 11 ainsi que la remarque ci-avant, nous pouvons conclure que le L_{Aeq} peut, pour un point de d'observation se trouvant à une distance d d'une voie de communication, s'exprimer comme suit²⁰:

$$L_{Aeq} = 10 \log(Q_{lv} + E \cdot Q_{zv}) + 23 \log(v) - 10 \log(d) + 4,5 + C_{\text{revêtement}} + C_{\text{météo}} + C_{\text{absorption de l'air}} + C_{\text{sol}} + C_{\text{pente chaussée}} + C_{\text{éléments de protection}} + C_{\text{végétation}} + C_{\text{régime de conduite}} \quad (\text{équation 12})$$

où :

Q_{vl} et Q_{pl} représentent respectivement les débits des véhicules légers et des véhicules lourds,

$C_{\text{revêtement}}$ représente un facteur de correction permettant de tenir compte de la qualité acoustique du revêtement de la chaussée (voir fiche 7),

$C_{\text{météo}}$ représente un facteur de correction permettant de tenir compte des conditions atmosphériques,

$C_{\text{absorption de l'air}}$ représente un facteur de correction permettant de tenir compte de l'absorption du bruit par l'air,

C_{sol} représente un facteur de correction permettant de tenir compte des influences du sol,

$C_{\text{pente chaussée}}$ représente un facteur de correction permettant de tenir compte de la pente de la chaussée,

$C_{\text{éléments de protection}}$ représente un facteur de correction permettant de tenir compte des qualités acoustiques du revêtement de la chaussée (voir fiche 12),

$C_{\text{végétation}}$ représente un facteur de correction permettant de tenir compte de l'absorption par la végétation présent entre l'observateur et la chaussée,

$C_{\text{régime de conduite}}$ représente un facteur de correction permettant de tenir compte du régime de conduite d'un flux de circulation.

²⁰ à condition que l'on se trouve en situation de terrain dégagé et que d soit beaucoup plus élevé la largeur de la chaussée

4.4. Propagation du bruit du trafic en terrains autres que dégagés

Dans le cas où l'on souhaite évaluer le niveau de pression acoustique le long d'une chaussée bordée, d'un seul côté ou de chaque côté, d'éléments acoustiques réfléchissants (bâtiments, murs...), il ne nous est pas possible d'utiliser les formules du chapitre 4.3. étant donné que les conditions correspondant aux terrains dégagés ne sont pas remplies : l'observateur enregistre non seulement le bruit provenant directement de la voie de circulation, mais aussi le bruit qui se réfléchit à une ou plusieurs reprises sur les façades des constructions. En présence d'éléments réfléchissants en bordure d'une voie de circulation, il y a lieu d'utiliser une formule adaptée permettant de calculer le L_{Aeq} , comme mentionné dans la référence^{xvii}. On distingue ainsi deux cas spécifiques : d'une part la chaussée avec profil en U, et d'autre part la chaussée avec profil en L ainsi que tous les autres cas.

4.4.1. Chaussées avec profil en U

La figure 15 représente la coupe transversale d'une rue. Celle-ci est bordée de deux rangées ininterrompues de bâtiments (voir situation concrète à la figure 16).

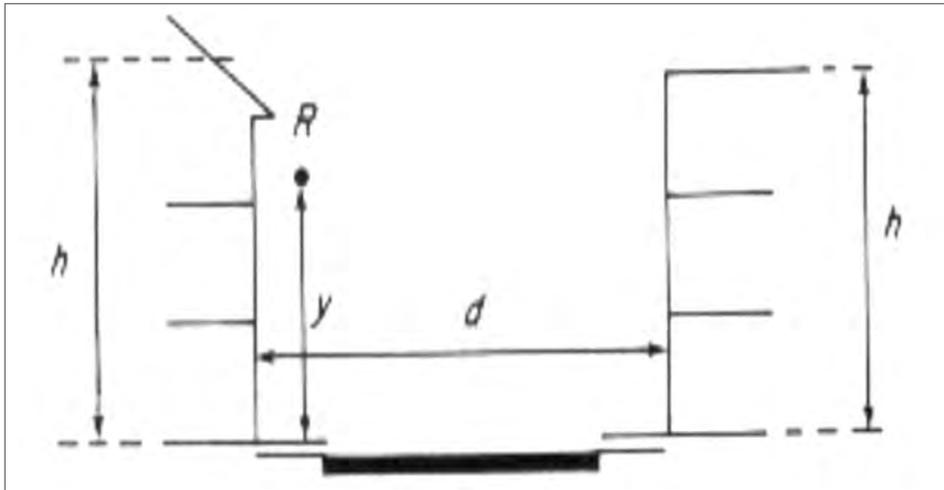


Figure 15 : Représentation schématique d'une rue avec "profil en U"



Figure 16: Exemple d'une rue avec "profil en U"

Les paramètres d et h , de la figure 15, représentent respectivement la distance entre les façades situées de part et d'autre de la rue et la hauteur de la façade la moins élevée. On parle de rue avec profil en U dans le cas de petites rues bordées de bâtiments mitoyens et élevés, où $h/d \geq 0,2$. Lorsque la largeur entre les deux rangées de façades est inférieure à cinq fois la hauteur de la façade la moins élevée, le bruit du trafic dans la rue est répercuté plusieurs fois entre les rangées opposées de façades. C'est ce que l'on appelle "l'effet de résonance", tout à fait typique également des espaces clos tels les grands volumes bénéficiant d'une faible absorption acoustique comme les églises, les halls industriels etc. Le niveau de pression acoustique est plus élevé lorsqu'il se produit un effet de résonance plutôt qu'en champ libre. Le niveau de pression acoustique équivalent L_{Aeq} enregistré au niveau des façades peut donc être calculé de manière estimative à l'aide de l'équation suivante (voir référence^{xviii}):

$$L_{Aeq} = 55 + 10 \log(Q_{vl} + E.Q_{zv}) - 10 \log(d) + C_h + C_v \quad (\text{équation 13})$$

Où :

- ◆ Q_{vl} et Q_{pl} représentent les débits des véhicules légers et lourds en termes de nombre de véhicules/heure et où E représente le rapport entre la puissance acoustique d'un véhicule lourd et la puissance acoustique d'un véhicule léger, comme défini précédemment. E est fonction de la pente de la chaussée, comme l'indique la dernière ligne du tableau 2.
- ◆ C_h représente un terme de correction permettant de tenir compte de la hauteur h d'un point de mesure (par rapport au niveau de la rue) : ce terme de correction est nul à moins de 4 m au-dessus du niveau de la rue. Lorsque le point d'observation se trouve à plus de 4 m, le niveau de pression acoustique diminue légèrement au fur et à mesure que la hauteur augmente et le terme de correction se calcule alors de la manière suivante :

$$C_h = - 2(h - 4)/d \quad (\text{équation 14})$$
- ◆ C_v représente un terme de correction permettant de tenir compte de la vitesse v d'un flux de circulation : lorsque la vitesse moyenne du flux de circulation est inférieure ou égale à 60 km/h, ce terme est égal à 0. Lorsque la vitesse est supérieure à 60 km/h, on tient compte d'une correction de 1 dB(A) par tranche de 10 km/h au-dessus des 60 km/h.

4.4.2. Chaussées avec profil en L et autres cas d'espèce

Une rue avec profil en L est une rue qui est bordée, d'un seul côté, par une rangée ininterrompue de bâtiments et qui présente, de l'autre côté, un espace acoustique ouvert (voir représentation schématique à la figure 17 et situation concrète à la figure 18).

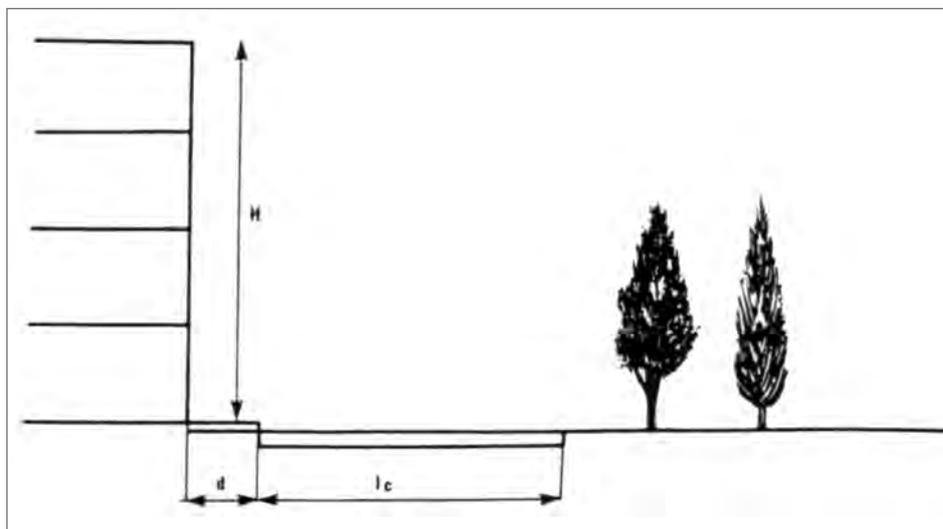


Figure 17 : Représentation schématique d'une rue avec "profil en L"



Figure 18 : Exemple d'une rue avec "profil en L"

Le niveau de pression acoustique équivalent à un point distant de 2 mètres des façades peut être, dans ce cas précis, estimé à l'aide de la formule suivante, suivant la référence^{xvii}:

$$L_{Aeq} = 20 + 10 \log(Q_{lv} + E.Q_{zv}) + 20 \log(v) - 12 \log(d + l_c/3) + 10 \log(\alpha/\pi) \quad (\text{équation 15})$$

où :

- ◆ d représente la distance entre le bord de la chaussée et l'observateur (qui se tient soit à 2 m des façades, soit à une distance d de la chaussée du côté non construit)
- ◆ l_c représente la largeur de la chaussée en m
- ◆ α représente l'angle sous lequel l'observateur perçoit la chaussée, exprimé en radians

L'équation 15 peut également être utilisée dans des situations autres que celles correspondant à un champ libre, une rue avec profil en U ou en L, comme par exemple une avenue bordée de bâtiments non mitoyens, séparés par des espaces ouverts d'un volume appréciable.

4.5. Références

- i C. Lamure, "Chapter 12 Road Traffic Noise: Generation, Propagation and Control", pp. 297-342 in "Noise Pollution", édité par A. Lara Sáenz et R. W. B. Stevens, publié par J. Wiley & Sons Ltd (1986)
- ii idem
- iii J. Lelong, R. Michelet, "Effect of acceleration on vehicle noise emission", Forum Acusticum, Berlin (1999)
- iv Synthèse: U. Sandberg, "Noise Emissions of Road Vehicles, Effects of Regulations, Final Report 01-1" by the I-INCE Working Party on Noise Emissions of Road Vehicles (WP-NERV), International Institute of Noise Control Engineering (juillet 2001), publié dans Noise/news International, Vol. 9, n° 3 (Septembre 2001)
- v F. Anfosso-Lédée, « Rappels sur la génération, la propagation et l'absorption du bruit de roulement », Journées d'étude « Bruit du Trafic Routier », Nantes (22-23 novembre 2001)
- vi T. Beckenbauer, A. Kuijpers, "Prediction of pass-by levels depending on road surface parameters by means of a hybrid model", Proceedings of INTERNOISE 2001 (Vol. 5), La Haye, (27-30 août 2001)
- vii A. Kuijpers, G. Van Blokland, "Tyre/road noise models in the last two decades: a critical evaluation", Proceedings of INTERNOISE 2001 (Vol. 5), La Haye, (27-30 août 2001)
- viii J. Ejsmont, "Tire/Road noise simulation for optimisation of the tread pattern", Proceedings of INTERNOISE 2000 (Vol. 1), Nice, (27-30 août 2000)
- ix U. Sandberg, "Six decades of vehicle noise abatement – But what happened to the tyres?", Proceedings of the Institute of Acoustics, Suède (1983)
- x S.M. Phillips, P.G. Abbott, "Factors affecting Statistical Pass-by measurements", Proceedings of INTERNOISE 2001 (Vol. 4), La Haye, (27-30 août 2001)
- xi résultats de l'essai sur les voitures de tourisme dans: U. Sandberg, J.A. Ejsmont, G. Ronowski, M. Dong, "Ecodriving – Effects on Vehicle noise Emission", Publication 2001:53E, Swedish National Road Administration, Borlaenge, Suède (2001) et résultats de l'essai sur les camions dans: U. Sandberg, "Noise Emission from Heavy Trucks Meeting the 84 and 80 dB(A) Limits", Proc. Of INTER-NOISE 92, Toronto, Ontario, Canada, pp. 829-834 (1992)
- xii Bergmann M. "Geräushestehung beim rollen auf benetzten oberflächen", Technische Universität Berlin (1979)
- xiii W. Liedl, E. Köhler, R. Eberspächer, "Untersuchung der Entstehungsmechanismen von Reifenrollgeräuschen bei Trockenheit und Nässe – Teil 1, ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift (1983); W. Liedl, E. Köhler, R. Eberspächer, "Untersuchung der Entstehungsmechanismen von Reifenrollgeräuschen bei Trockenheit und Nässe – Teil 2, ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift (1984); W. Liedl, E. Köhler, Tyre rolling noise in dry and wet conditions on pavement surfaces of different skid resistance", American Society for Testing and Materials, special technical publication 793 (1983)
- xiv (à compléter)
- xv brochure Vereniging tot Bevordering van Werken in Asfalt (VBW-Asfalt), Postbus 68, 3620 AB Breukelen, Pays-Bas, (novembre 1999) (à remplacer par la référence au véritable SRM?)
- xvi voir par exemple: "Guide du Bruit des Transports Terrestres – Prévision des niveaux sonores", Ministère de l'Environnement et du Cadre de Vie et Ministère des Transports (novembre 1980)
- xvii Bowlby W. e.a., "Predicting Stop-and-Go Traffic Noise Levels", National Cooperative Highway Research Program Report, Transportation Research Board, National Research Council, Washington (1989)