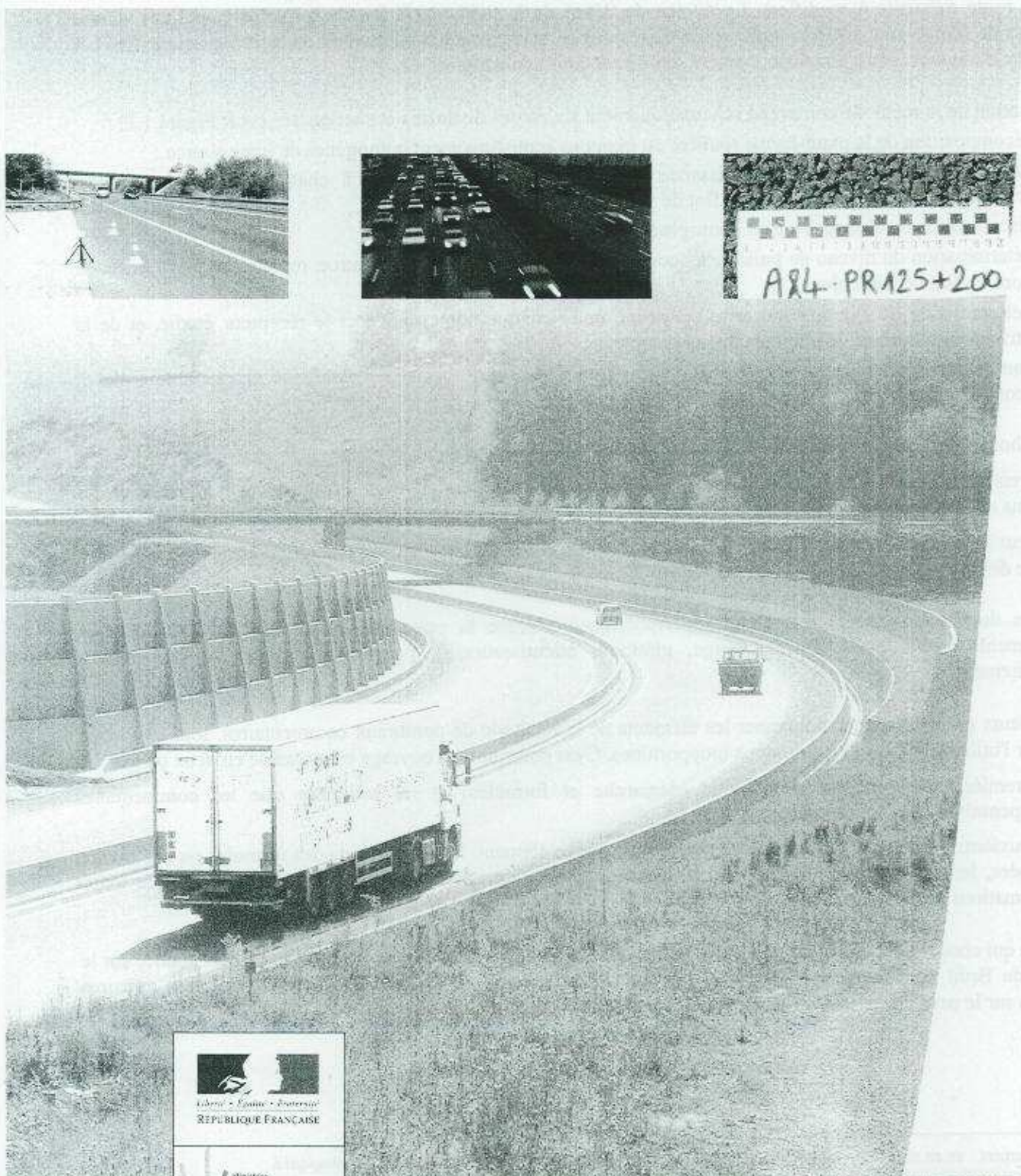


Prévision du bruit routier

1 - Calcul des émissions sonores dues au trafic routier



Prévisions des émissions sonores dues au trafic routier

Présen
pour
l'avenir



Ministère
de l'Énergie, de l'Énergie,
du Développement durable
et de l'Aménagement
du territoire

1 – Introduction

La méthode de prévision du bruit routier permet de calculer le niveau sonore équivalent $L_{Aeq}(T)$ de long terme causé par un trafic routier en un point récepteur situé au voisinage de l'infrastructure. Le niveau sonore de long terme est le niveau sonore correspondant à des conditions moyennes de circulation et des conditions météorologiques moyennes représentatives d'une longue période, sur lequel est notamment fondée la réglementation actuelle relative au bruit des infrastructures routières [1], [2].

Le calcul peut porter indifféremment sur une configuration existante ou sur une configuration future (route en projet, route existante à modifier). Le niveau de détail de la méthode la destine principalement aux études d'impact de projets routiers, à la vérification du respect de la réglementation ou d'un objectif acoustique fixé par le maître d'ouvrage, et au dimensionnement des protections acoustiques.

L'utilisation de la méthode comprend schématiquement six étapes distinctes et successives (voir Figure 1.1) :

- 1) la décomposition de la plate-forme routière en tronçons acoustiquement homogènes de ligne source ;
- 2) la détermination du niveau de puissance acoustique par mètre associé à chaque tronçon homogène, représentatif de l'émission sonore du flot de véhicules ;
- 3) la discrétisation de chaque tronçon homogène en sources sonores ponctuelles ;
- 4) la détermination du niveau de puissance acoustique associé à chaque point source, représentatif de l'émission sonore du flot de véhicules ;
- 5) la détermination de l'atténuation en propagation entre chaque point source et le récepteur étudié, et de la contribution sonore de ce point source au récepteur ;
- 6) la sommation des contributions sonores des différents points sources afin d'obtenir le niveau sonore global $L_{Aeq}(T)$ au récepteur.

La méthode "Prévision du bruit routier" est composée de deux documents :

- le premier intitulé "Calcul des émissions sonores dues au trafic routier" traite des étapes 1 et 2 présentées ci-dessus et correspond au présent ouvrage,
- le deuxième intitulé "NMPB 2008 – Méthode de propagation du bruit incluant les effets météorologiques". Il traite des étapes 3 à 6.

D'autres documents relatifs à des sujets périphériques, comme la prise en compte de zones particulières (revêtements pavés, point d'arrêt, virage, giratoire, ralentisseurs...), pourront si nécessaire être publiés ultérieurement.

Les auteurs ont souhaité accompagner les éléments de la méthode de nombreux commentaires, tout en évitant d'égarer l'utilisateur par des digressions inopportunes. C'est pourquoi cet ouvrage est organisé en deux parties :

- la première partie décrit la méthode (démarche et formules) et ne comporte que les commentaires indispensables à sa bonne compréhension ;
- la deuxième partie présente les enjeux associés à chaque élément, les fondements des formules ou des valeurs utilisées, leurs limites, les modifications intervenues par rapport à la pratique antérieure, ainsi que toutes informations jugées utiles au lecteur.

Pour ce qui concerne le calcul de l'émission sonore du flot de véhicules, la pratique antérieure était fondée sur le Guide du Bruit des Transports Terrestres [3]. Le présent document fournit des valeurs d'émission unitaires fondées sur le parc de véhicules actuel, et comporte les nouveautés suivantes :

1 Typiquement : un an pour les conditions de circulation, plusieurs années pour les conditions météorologiques.

- la décomposition de l'émission en deux composantes : la composante "roulement", supposée émise par le contact pneumatique-chaussée, et la composante "moteur", supposée émise par l'ensemble des sources mécaniques des véhicules :
 - la prise en compte de l'influence du revêtement de chaussée sur le bruit émis,
 - une méthode pour estimer la répartition du trafic moyen journalier sur les périodes 6 h – 22 h, 6 h – 18 h, 18 h – 22 h et 22 h – 6h, visées par la réglementation [2] ou par la transposition de la directive européenne relative à l'évaluation et la gestion du bruit dans l'environnement [4], [5], [6] ;
- des recommandations relatives aux hypothèses de vitesse et d'allure des véhicules.

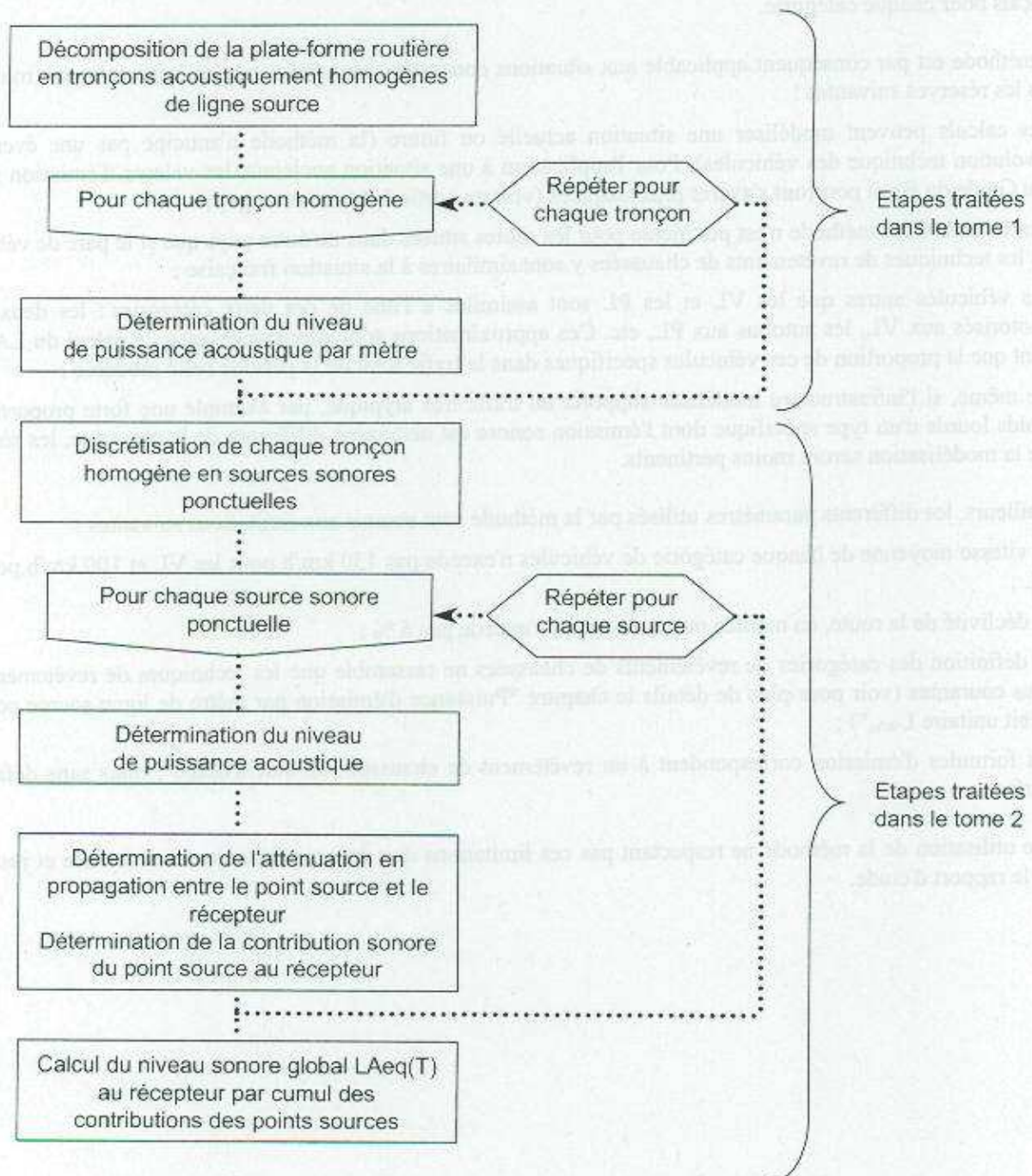


Figure 1.1 - Organigramme simplifié de la méthode

2 – Méthode factuelle

2.1 - Domaine d'emploi

La présente partie décrit la démarche de décomposition de la plate-forme routière en tronçons acoustiquement homogènes de ligne source et la détermination du niveau de puissance acoustique par mètre associé à chaque tronçon, représentatif de l'émission sonore du flot de véhicules.

La méthode ne considère que deux catégories de véhicules : les véhicules légers (VL) et les poids lourds (PL). Les formules d'émission sonore utilisées sont issues de mesures réalisées entre 1995 et 2005 et décrites en détail en partie 3 de cet ouvrage. Ces formules sont des estimations moyennes représentatives du parc de véhicules français pour chaque catégorie.

La méthode est par conséquent applicable aux situations courantes rencontrées sur les infrastructures routières, sous les réserves suivantes :

- les calculs peuvent modéliser une situation actuelle ou future (la méthode n'anticipe pas une éventuelle évolution technique des véhicules). Pour l'application à une situation ancienne, les valeurs d'émission sonore du Guide du Bruit pourront s'avérer plus adaptées (voir en partie 3 de cet ouvrage) ;
- l'utilisation de la méthode n'est pertinente pour les routes situées dans un autre pays que si le parc de véhicules et les techniques de revêtements de chaussées y sont similaires à la situation française ;
- les véhicules autres que les VL et les PL sont assimilés à l'une de ces deux catégories : les deux-roues motorisés aux VL, les autobus aux PL, etc. Ces approximations sont admissibles pour le calcul du $L_{Aeq}(T)$ tant que la proportion de ces véhicules spécifiques dans le trafic total de la période reste modérée ;
- de même, si l'infrastructure modélisée supporte un trafic très atypique, par exemple une forte proportion de poids lourds d'un type spécifique dont l'émission sonore est nettement différente de la moyenne, les résultats de la modélisation seront moins pertinents.

Par ailleurs, les différents paramètres utilisés par la méthode sont soumis aux limitations suivantes :

- la vitesse moyenne de chaque catégorie de véhicules n'excède pas 130 km/h pour les VL et 100 km/h pour les PL ;
- la déclivité de la route, en montée ou en descente, n'excède pas 6 % ;
- la définition des catégories de revêtements de chaussées ne rassemble que les techniques de revêtements les plus courantes (voir pour plus de détails le chapitre "Puissance d'émission par mètre de ligne source pour un débit unitaire L_{Wm} ") ;
- les formules d'émission correspondent à un revêtement de chaussée "en état d'usage", mais sans défaut de surface.

Toute utilisation de la méthode ne respectant pas ces limitations doit être explicitement mentionnée et justifiée dans le rapport d'étude.

2.2 - Définitions de portée générale

2.2.1 - Grandeurs acoustiques

Deux types de niveaux de pression sonore sont utilisés en bruit des transports : le niveau maximal utilisé par exemple pour caractériser le bruit au passage d'un véhicule, et le niveau équivalent utilisé pour caractériser par exemple le bruit dû au trafic. Tous deux sont exprimés en décibels. Un niveau sonore L en décibel est défini par une relation de la forme :

$$L = 10 \log \frac{p_m^2}{p_0^2} \quad (1)$$

où p_m est une moyenne de la pression quadratique et p_0 la pression de référence $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$. Systématiquement la pression acoustique est prise avec la pondération fréquentielle A. On parle donc de niveau pondéré A.

2.2.1.1 - Niveau de pression acoustique équivalent

Le niveau de pression acoustique équivalent caractérise un bruit sur une durée T donnée. Il utilise la moyenne de la pression quadratique. Il peut dépendre du moment considéré. Il est écrit $LA_{eq,T}(t)$ et est donné par la relation :

$$LA_{eq,T}(t) = 10 \log \left[\frac{1}{T} \int_{t-T}^t \frac{p_A^2(\tau)}{p_0^2} d\tau \right] \quad (2)$$

L'évolution du trafic peut être par exemple caractérisé par l'évolution du niveau équivalent pris sur une heure $LA_{eq,1h}$.

2.2.1.2 - Niveau de pression acoustique FAST

Pour caractériser le bruit d'un véhicule, on utilise l'évolution de son niveau de pression au passage. La moyenne considérée pour la pression quadratique est une moyenne pondérée dite FAST. Le niveau de pression acoustique est dénommé niveau de pression acoustique FAST :

$$L_{A,FAST}(t) = 10 \log \left[\int_{-\infty}^t e^{-\frac{t-\tau}{0,125}} \frac{p_A^2(\tau)}{p_0^2} d\tau \right] \quad (3)$$

où t et τ sont exprimés en secondes. La pondération exponentielle $e^{-\frac{t-\tau}{0,125}}$ réduit d'autant plus la contribution de $p_A^2(\tau)$ que son occurrence est éloignée de l'instant considéré (que $t - \tau$ est important).

2.2.1.3 - Niveau maximum au passage

Le bruit d'un véhicule au passage est le plus souvent caractérisé par la valeur maximum de son niveau de pression FAST :

$$L_{A,max} = \max \{ L_{A,FAST}(t) \} \quad (4)$$

2.2.1.4 – Indicateurs statistiques, niveaux acoustiques fractiles

C'est le niveau de pression acoustique FAST qui est dépassé pendant N% de l'intervalle de temps considéré, de symbole $L_{A,N,T}$. Par exemple $L_{A,95,1h}$ est le $L_{A,FAST}(t)$ dépassé pendant 95% de 1h.

2.2.1.5 – Niveau de puissance acoustique

Une puissance acoustique W est caractérisée par son niveau de puissance acoustique L_W , donné en décibel par la relation :

$$L_W = 10 \log \frac{W}{W_0} \quad (5)$$

où $W_0 = 1pW$ est la puissance acoustique de référence.

2.2.1.6 – Bandes d'octave et de tiers d'octave

Intervalle entre deux fréquences dont le rapport est égal à 2 (resp. $2^{\frac{1}{3}}$). Ces fréquences définissent les limites de la bande. La bande est habituellement désignée par sa fréquence médiane, qui est la moyenne géométrique des deux fréquences limites.

2.2.2 - Catégories de véhicules

2.2.2.1 – Véhicules légers (VL)

Ce terme désigne les véhicules dont le PTAC est inférieur à 3,5 tonnes.

2.2.2.2 – Poids lourds (PL)

Ce terme désigne les véhicules dont le PTAC est égal ou supérieur à 3,5 tonnes.

2.2.3 - Cinématique des véhicules

2.2.3.1 – Vitesse

Ce terme désigne la vitesse moyenne d'une catégorie de véhicules (VL ou PL). La vitesse est exprimée en km/h.

2.2.3.2 – Allure

Ce terme caractérise la variation dans le temps de la vitesse d'un véhicule ou d'une catégorie de véhicules. On distingue dans l'ouvrage trois types d'allure :

- l'allure stabilisée, où la vitesse du véhicule ou du flot de véhicules est sensiblement constante,
- l'allure accélérée,
- l'allure décélérée.

2.2.4 - Grandeurs caractéristiques du trafic

2.2.4.1 – Débit

Le débit Q représente le nombre de véhicules N passant en un point x du réseau pendant une période d'observation T :

$$Q_{x,T} = \frac{N_{x,T}}{T} \quad (6)$$

Le débit est généralement exprimé en véh/h.

2.2.4.2 – Concentration

La concentration K (exprimée en véh/m) représente le nombre de véhicules présent entre les positions x et $x + \Delta x$ du réseau à l'instant t :

$$K_{t,x+\Delta x} = \frac{N_{x,x+\Delta x,t}}{\Delta x} \quad (7)$$

2 ; 2.5 - Profil de la voie

2.2.5.1 – Profil en long

Deux types de profil en long sont distingués dans l'ouvrage :

- les routes horizontales (pentes inférieures ou égales à 2%)
- les déclivités (pentes supérieures à 2%). Selon le sens de parcours du véhicule, la déclivité sera appelée montée ou descente.

2.3 - Démarche générale de calcul de l'émission

Pour les besoins des calculs acoustiques, la route est modélisée par une succession de tronçons acoustiquement homogènes de lignes sources réparties sur la plate-forme. A chaque tronçon acoustiquement homogène est associée une puissance d'émission sonore par mètre de ligne source. La démarche générale de calcul est représentée en figure 2.1. Elle est décrite sommairement ci-dessous, chaque étape faisant l'objet de renvois aux chapitres correspondants.

2.3.1 - Décomposition de la route en lignes sources

Dans le cas général, la route est décomposée en autant de lignes sources que de voies de circulation. Le chapitre 2.6.1 précise les situations dans lesquelles il peut être admis de recourir à un nombre de lignes sources plus réduit.

2.3.2 - Données nécessaires

La décomposition de la route en tronçons acoustiquement homogènes nécessite de disposer au préalable des grandeurs ayant une influence sur l'émission sonore du flot de véhicules :

- le débit moyen horaire de la période pour chaque catégorie de véhicules (VL et PL) (voir chapitre 2.4) ;
- la vitesse et l'allure représentatives de chaque catégorie de véhicules (VL et PL) (voir chapitre 2.5) ;
- la catégorie de revêtement de chaussée (voir chapitre 2.7.2) ;
- la déclivité de la route.

Ces éléments doivent être connus ou estimés de façon continue le long de l'infrastructure à modéliser, et dans le cas général de façon distincte pour chaque voie de circulation.

2.3.3 - Découpage de chaque ligne source en tronçons acoustiquement homogènes

Un tronçon acoustiquement homogène de ligne source est une portion de la route sur laquelle l'émission sonore du flot de véhicules varie peu, et sur laquelle on considérera dans la modélisation que cette émission est uniforme. Lorsque l'émission sonore varie substantiellement le long d'une ligne source, celle-ci doit être découpée en plusieurs tronçons homogènes. Le chapitre 2.6.2 expose les règles régissant ce découpage, en fonction des variations longitudinales des paramètres influant sur l'émission sonore (débits, vitesses, allures, catégorie de revêtement, déclivité de la route).

2.3.4 - Calcul de la puissance acoustique par mètre de ligne source pour un débit unitaire

Pour chaque tronçon acoustiquement homogène, le niveau de puissance acoustique par mètre de ligne source pour un débit de 1véh/h (dit "débit unitaire"), noté $L_{W/m/véh}$, est calculé pour les VL et les PL à partir de la vitesse, de l'allure, de la catégorie de revêtement et de la déclivité de la route. Ce calcul est détaillé au chapitre 2.7.

2.3.5 - Calcul de la puissance acoustique par mètre de ligne source

Le niveau de puissance d'émission sonore par mètre de ligne source $L_{W/m}$ est obtenu, par bande de tiers d'octave, par :

$$L_{W/m}(j) = [(L_{W/m/VL} + 10\log(Q_{VL})) \oplus (L_{W/m/PL} + 10\log(Q_{PL}))] + R(j) \quad (8)$$

avec :

j indice de la bande de tiers d'octave

$L_{W/m/véh}$ puissance d'émission par mètre de voie de la catégorie de véhicules pour un débit unitaire (1 véh/h)

$Q_{véh}$ débit moyen horaire de la catégorie de véhicules

\oplus représente l'addition énergétique : $L_1 \oplus L_2 = 10 \cdot \log \left[10^{\frac{L_1}{10}} + 10^{\frac{L_2}{10}} \right]$

$R(j)$ répartition spectrale de la puissance d'émission (voir chapitre 2.8).

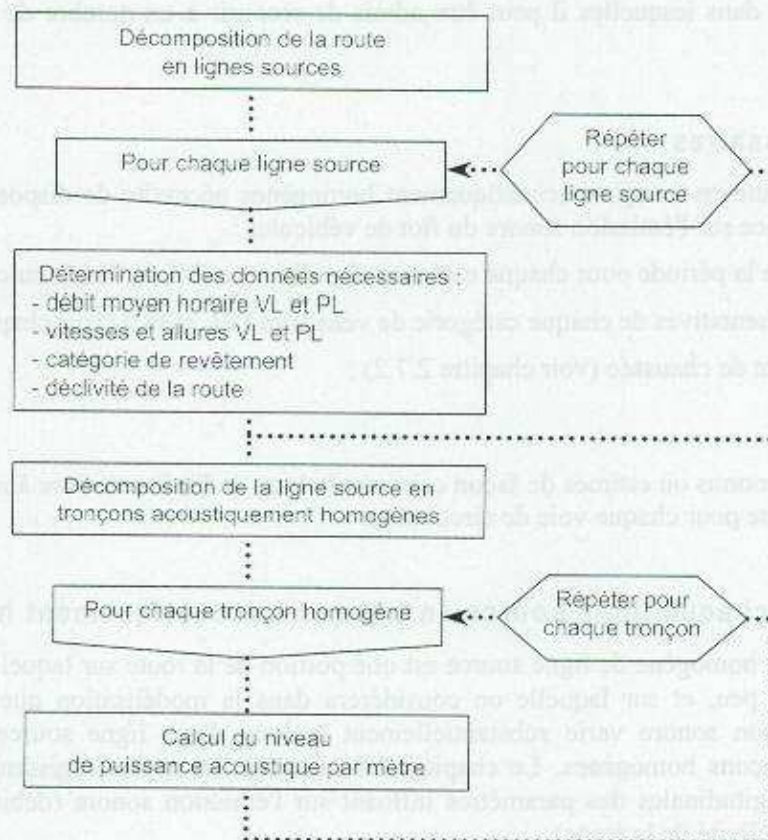


Figure 2.1 - Organigramme de la démarche de calcul de l'émission

2.4 - Hypothèses de débit des véhicules

2.4.1 - Généralités

Le calcul d'un niveau sonore équivalent LAeq(T) de long terme nécessite de connaître les débits moyens horaires représentatifs de chaque catégorie de véhicules (VL et PL) sur la période T étudiée. Les périodes généralement visées pour les besoins usuels (étude de projet, cartographie stratégique, etc.) sont les périodes 6h-22h (qui peut être scindée en 6h-18h et 18h-22h) et 22h-6h.

Les débits moyens horaires de chaque catégorie de véhicules sur chacune de ces périodes sont rarement disponibles dans le cadre d'une étude de bruit. Il est généralement nécessaire d'estimer ces débits à partir des TMJA (trafics moyens journaliers annuels) adoptés comme hypothèses. Cette démarche est décrite en deuxième partie de cet ouvrage, au chapitre 3.2.2. Elle peut consister selon le cas soit à analyser des comptages effectués sur le site étudié ou un site associé, soit à appliquer au TMJA des formules d'estimation dépendant de la fonction de la route et de la catégorie de véhicules. Ces formules, accompagnées de leur domaine d'emploi, sont présentées ci-après en distinguant les axes interurbains (cf. 2.4.2) et les axes urbains (cf. 2.4.3).

Dans tous les cas, y compris ceux où des hypothèses de débits horaires sont initialement disponibles, les valeurs utilisées dans l'étude acoustique ne doivent pas être supérieures au débit horaire équivalent de l'émission sonore maximale du flot (cf. 2.4.4).

2.4.2 - Routes et autoroutes interurbaines

Pour les routes et autoroutes interurbaines (situées hors des grandes agglomérations), des formules d'estimation de la répartition des trafics VL et PL sur les quatre périodes 6h-22h, 6h-18h, 18h-22h et 22h-6h ont été publiées dans la note d'information du Sêtra série EEC n°77 [7].

Ces formules dépendent d'une part du type d'axe (route, autoroute) et d'autre part de sa fonction ("longue distance" ou régionale). La note d'information précise également le domaine d'emploi des formules ainsi que l'intervalle de confiance associé.

Le lecteur est renvoyé à cette note d'information à l'annexe 3.

2.4.3 - Axes urbains

2.4.3.1 - Paramètre utilisés

Les hypothèses de débit des véhicules nécessaires pour les études acoustiques sont les débits horaires moyen par type de véhicules et pour chaque période visée (cf. 2.4.1). Pour les axes urbains la donnée d'entrée permettant de déterminer ou d'estimer ces débits est soit le TMJA soit le débit tous véhicules à l'heure de pointe du soir HPS. Les débits horaires moyens par type de véhicule sont alors obtenus à partir de ces données d'entrée et pour une période donnée selon les formules suivantes :

$$Q_{VL,jour} = \frac{TMJA \times \%TV_{jour} \times (1 - \%PL_{jour})}{16} \quad (9)$$

$$Q_{PL,jour} = \frac{TMJA \times \%TV_{jour} \times \%PL_{jour}}{16} \quad (10)$$

$$Q_{VL,nuit} = \frac{TMJA \times \%TV_{nuit} \times (1 - \%PL_{nuit})}{8} \quad (11)$$

$$Q_{PL,nuit} = \frac{TMJA \times \%TV_{nuit} \times \%PL_{nuit}}{8} \quad (12)$$

$$TMJA = \frac{Q_{hps}}{\%HPS} \quad (13)$$

où :

TMJA est le débit journalier annuel tous véhicules ;

$Q_{VL, \text{ jour}}$, $Q_{PL, \text{ jour}}$, $Q_{VL, \text{ nuit}}$, $Q_{PL, \text{ nuit}}$ sont les débits horaires moyens respectivement pour les VL et PL et sur les périodes jour et nuit ;

$\%PL_{\text{jour}}$ et $\%PL_{\text{nuit}}$ sont les pourcentages de poids lourds sur les périodes jour et nuit ;

$\%TV_{\text{jour}}$ et $\%TV_{\text{nuit}}$ sont les pourcentages du débit tous véhicules sur les périodes jour et nuit ;

Q_{ops} est le débit tous véhicules à l'heure de pointe du soir ;

$\%HPS$ est le pourcentage du débit tous véhicules à l'heure de pointe du soir par rapport au TMJA.

2.4.3.2 - Définition des types d'axes urbains

Les coefficients de passage du TMJA ou débit heure pointe du soir aux débits horaires moyens diffèrent selon le type de voirie urbaine étudié. On distingue 3 types de voirie urbaine :

Voiries structurantes urbaines : Autoroutes urbaines ou voies rapides urbaines avec échangeurs, voies à circulation rapide (90 km/h ou 70 km/h) avec carrefours plans et rares dénivellations, grandes voies ou artères (50 km/h), taux de PL nocturne élevée

Voiries urbaines intersecteurs : grandes voies, artères ou rues classiques limitées à 50 km/h avec carrefours plans sans dénivellation, taux de PL faible de jour et très faible de nuit

Voiries urbaines de secteurs : voies à circulation lente (30 km/h), taux de PL jour très faible

2.4.3.3 - Hypothèses relatives aux débits horaires

Pour les voies rapides urbaines (VRU) et pour la période de jour, on peut adopter, par principe de précaution, les conditions de trafic correspondant à l'émission sonore maximale (cf. 2.4.4). Ce sera le cas notamment lorsque les prévisions de trafic prévoient à court ou moyen terme une utilisation de la voirie à capacité. Pour la période de nuit par contre il sera toujours nécessaire d'avoir une estimation spécifique des débits. En effet les débits nocturnes ne peuvent pas être déduits des débits diurnes sous peine de conduire à des erreurs importantes dans l'estimation.

Pour les autres voiries urbaines, les données trafic produites dans les études de DVA (Dossier de Voirie d'Agglomération) et de PDU (Plan de Déplacement Urbain) peuvent fournir des hypothèses à l'heure de pointe du soir. Cependant ces informations ne concernent en général que les véhicules légers et des hypothèses devront être faites pour les poids lourds.

En l'absence de données locales, les valeurs des paramètres de trafic pourront être adoptées dans les limites indiquées dans le tableau 2.2 suivant :

	TMJA en véh/j	%PL	%HPS	%TV _{jour}	%TV _{nuit}
Voiries structurantes urbaines	17 000 à 217 000	5 à 20 % de jour 5 à 35 % de nuit	7,5 à 9,5	-	-
Voiries urbaines intersecteurs	2 500 à 25 000 (50 000 en Île-de-France)	0 à 5 %	6,5 à 9,5	85 % à 95 %	15 % à 5 %
Voiries urbaines de secteurs					

2.4.4 - Débit horaire équivalent de l'émission sonore maximale du flot

Le débit horaire (tous véhicules) correspondant à l'émission sonore maximale du flot dépend du type d'axe, du nombre de voies par chaussée ainsi que de la proportion de PL (notée ci-après %PL). Les considérations générales sur cette notion ainsi que l'origine des formules qui suivent sont présentées en deuxième partie de cet ouvrage, au chapitre 3.2.

Autoroute interurbaine

- pour une chaussée de 2 voies : $Q_{TV_equiv} = 2000 - 10 \times \%PL$ (14)

- pour une chaussée de 3 voies : $Q_{TV_equiv} = 3300 - 22 \times \%PL$ (15)

Les vitesses associées à ces formules sont précisées au paragraphe 2.5.2.

Route interurbaine

Aucune formule spécifique n'est disponible. On admettra que les formules relatives aux autoroutes interurbaines s'appliquent également aux routes interurbaines.

Voies rapides urbaines de type A

Les formules à prendre en compte pour les voies rapides urbaines de type A sont les suivantes :

- pour une chaussée de 2 voies : $Q_{TV_equiv} = 3050 - 24,8 \times PL$ (16)

- pour une chaussée de 3 voies : $Q_{TV_equiv} = 4633 - 37,6 \times PL$ (17)

- pour une chaussée de 4 voies : $Q_{TV_equiv} = 4771 - 37,6 \times PL$ (18)

Axes urbains

Le débit horaire tous véhicules Q_{TV} correspondant à l'émission sonore maximale est pris égal à 1800 véh/h/voie pendant la durée des feux verts. Ce débit est à pondérer par le pourcentage de temps de feu vert lorsque l'axe considéré est régi par des feux tricolores.

2.5 - Hypothèses de vitesse et d'allure

2.5.1 - Généralités

Les hypothèses de vitesse à utiliser correspondent à la vitesse moyenne arithmétique de chaque catégorie de véhicules.

L'allure caractérise l'ensemble du flot, et non chaque catégorie de véhicules indépendamment. On distingue trois cas : allure stabilisée, accélération ou décélération, sans prendre en compte de façon numérique la valeur de l'accélération.

Sauf exception étayée par des observations relatives au site étudié, on adoptera des hypothèses de vitesses et d'allure identiques pour l'ensemble des périodes (jour, soirée, nuit, etc.).

2.5.2 - Hypothèses en section courante

En section courante, hors zones particulières dont la géométrie induirait des contraintes sur la vitesse (fortes rampes, virages de faible rayon, etc.), on adopte comme hypothèse de vitesse pour les VL la vitesse maximale réglementaire. Pour les PL, on adopte les valeurs forfaitaires indiquées dans le tableau 2.3 suivant ou la vitesse réglementaire si elle est inférieure :

Type d'infrastructure	Vitesse PL (km/h)
Autoroute de liaison	90
Voie rapide urbaine	90
Route à chaussées séparées	85
Route à chaussée unique	80
En agglomération	vitesse réglementaire

Tableau 2.3 – Valeurs prises pour la vitesse des PL.

L'allure du flot est stabilisée.

2.5.3 - Hypothèses pour les zones particulières

Des hypothèses spécifiques doivent être adoptées sur les sections dont la géométrie est contraignante, ainsi qu'aux abords d'aménagements particuliers : rampe et descente, virage, approche et sortie d'un point d'arrêt (carrefour, barrière de péage, etc.), giratoire, bretelle d'entrée et de sortie de voie rapide, abords de ralentisseurs, etc.

Sur les 20 derniers mètres en amont d'un point d'arrêt et sur les 20 premiers mètres en aval d'un point d'arrêt, la présente méthode définit une procédure particulière, consistant à utiliser une puissance d'émission sonore uniforme (cf. chap. 2.6.2.2). Il n'est donc pas nécessaire, sur ces tronçons, de définir des hypothèses de vitesse et d'allure des véhicules. La vitesse des véhicules (VL et PL) en entrée du tronçon d'arrêt et en sortie du tronçon de démarrage est de 25 km/h.

Les hypothèses de vitesse et d'allure associées à d'autres aménagements ne sont pas abordées dans le présent ouvrage. Concernant les vitesses, des éléments utiles pourront être trouvés dans les guides relatifs à la conception géométrique des infrastructures routières, dont une liste est fournie pour information en deuxième partie de cet ouvrage, chap. 3.3.

2.6 - Recommandations relatives à la décomposition de la source

2.6.1 - Décomposition de la route en lignes sources

Dans le cas général, la route est décomposée en autant de lignes sources que de voies de circulation. Chaque ligne source est placée au centre de la voie.

Le recours à un nombre de lignes sources plus réduit est admis dans les cas suivants :

- **Pour les routes à deux voies**, la route peut être représentée par une ligne source unique placée au milieu de la plate-forme si les conditions suivantes sont réunies :

- la puissance d'émission sonore (autrement dit tous les facteurs d'influence : débits, vitesses, allures, revêtement de chaussée, déclivité) est similaire dans les deux sens de circulation,
- le calcul acoustique ne porte que sur des récepteurs situés à plus de 11 m de l'axe de la route.

- **Pour les routes à plus de deux voies**, si le calcul acoustique ne porte que sur des récepteurs en vue directe sur la route :

La route peut être représentée par une seule ligne source par sens de circulation, placée au milieu de chaque chaussée, si tous les récepteurs considérés sont situés à une distance de l'axe de la route d'au moins 2,4 fois la largeur de la plate-forme.

En outre, si la puissance d'émission sonore (débits, vitesses, allures, revêtement de chaussée, déclivité) est similaire dans les deux sens de circulation, la route peut être représentée par une ligne source unique placée au milieu de la plate-forme.

• **Pour les routes à plus de deux voies, si le calcul acoustique comporte des récepteurs en vue masquée sur la route :**

La route peut être représentée par une seule ligne source par sens de circulation, placée au milieu de chaque chaussée, si tous les récepteurs considérés sont situés à une distance de l'axe de la route d'au moins 6 fois la largeur de la plate-forme.

Il n'est pas admis de représenter la route par une ligne source unique.

2.6.2 - Découpage de chaque ligne source en tronçons acoustiquement homogènes

2.6.2.1 - Cas général : section courante

Un tronçon acoustiquement homogène de ligne source est une portion de la route sur laquelle l'émission sonore du flot de véhicules varie peu, et sur laquelle on considérera dans la modélisation que cette émission est uniforme. En pratique, la variation des facteurs influençant l'émission sonore doit respecter sur un tronçon acoustiquement homogène les valeurs maximales figurant dans le tableau 2.4.

Facteur	Variation
Débit moyen horaire de la période pour chaque catégorie de véhicules (VL et PL)	Variation maximale 5 %
Vitesse représentative de chaque catégorie de véhicules	Variation maximale 10 km/h
Allure représentative de chaque catégorie de véhicules	pas de changement d'allure
Catégorie de revêtement de chaussée	pas de changement de catégorie de revêtement de chaussée
Déclivité de la route (si elle est supérieure à 2 %)	Variation maximale 1 %

Tableau 2.4 - Variations maximales sur un tronçon acoustiquement homogène

Si l'une de ces exigences n'est pas respectée, le tronçon considéré doit être subdivisé en plusieurs tronçons acoustiquement homogènes.

2.6.2.2 - Cas particulier : tronçon précédant ou suivant un point d'arrêt

Aux très faibles vitesses, lorsque les véhicules accélèrent ou décélèrent, la variation maximale de la vitesse admissible sur un tronçon acoustiquement homogène devrait être de l'ordre de 5 km/h pour assurer une faible variation de l'émission. Or en situation de démarrage ou précédant immédiatement un arrêt, une telle variation de vitesse intervient sur des distances très courtes, ce qui conduirait à subdiviser la ligne source en tronçons homogènes de très faible longueur. Un découpage aussi fin est inutile pour conserver une bonne précision de l'évaluation au point récepteur. Il est possible, sans induire une erreur significative, de modéliser ces zones par un tronçon d'émission sonore uniforme.

En pratique, si la route comporte un point d'arrêt (carrefour à feux, stop, perte de priorité, etc.), on considérera sur les 20 derniers mètres en amont du point d'arrêt un unique tronçon, dit "tronçon d'arrêt". De même, sur les 20 premiers mètres en aval du point d'arrêt, on considérera un unique tronçon, dit "tronçon de démarrage". Sur chacun de ces deux tronçons, l'émission sonore utilisée pour les calculs est uniforme. La vitesse des véhicules (VL et PL) en entrée du tronçon d'arrêt et en sortie du tronçon de démarrage est de 25 km/h. La justification de ce principe est exposée au chapitre 2.7, sous-chapitre 2.7.4 de cet ouvrage.

2.7 - Puissance d'émission par mètre de ligne source pour un débit unitaire $L_{w/m}$

2.7.1 - Principes

2.7.1.1 - Cas général : composantes moteur et roulement

Pour chaque catégorie de véhicules, la puissance d'émission sonore par mètre de ligne source pour un débit de 1 véh/h (dit "débit unitaire"), notée $L_{w/m\text{véh}}$, est calculée par :

$$L_{w/m\text{véh}} = L_{r_w/m} \oplus L_{m_w/m} \quad (19)$$

Où

$L_{r_w/m}$ est la composante de $L_{w/m\text{véh}}$ supposée émise par le contact pneumatique-chaussée, dite aussi "composante roulement" ;

$L_{m_w/m}$ est la composante de $L_{w/m\text{véh}}$ supposée émise par l'ensemble des sources mécaniques des véhicules, dite aussi "composante moteur" ;

\oplus représente l'addition énergétique : $L_1 \oplus L_2 = 10 \cdot \log[10^{L_1/10} + 10^{L_2/10}]$

Le mode de calcul des deux composantes est décrit ci-après.

Remarque : les expressions "composante moteur" et "composante roulement" sont des facilités de langage. Les auteurs ne prétendent pas à la pertinence de chacun de ces deux termes pris isolément sur l'ensemble du domaine de vitesses, mais uniquement à celle de leur somme énergétique $L_{w/m\text{véh}}$. Pour plus de détails, voir en partie 3 de cet ouvrage le chapitre 3.4.

2.7.1.2 - Cas particulier : tronçons "de démarrage" et "d'arrêt"

On a défini au chapitre 2.6 un tronçon acoustiquement homogène dit "de démarrage" sur les 20 premiers mètres en aval d'un point d'arrêt, et un tronçon acoustiquement homogène dit "d'arrêt" sur les 20 derniers mètres en amont d'un point d'arrêt. Ces tronçons correspondent aux zones dans lesquelles la vitesse des véhicules (VL et PL) est inférieure à 25 km/h. Sur chacun de ces deux tronçons, la puissance d'émission utilisée est uniforme. Les valeurs de $L_{w/m\text{véh}}$ à utiliser sont fournies à l'annexe 4.

2.7.2 - Composante "roulement"

2.7.2.1 - Définition des catégories de revêtements

L'influence du revêtement de chaussée sur le bruit émis par les véhicules a fait l'objet en France de nombreuses mesures (procédures décrites dans [19], [20]) dont les résultats sont rassemblés dans une base de données. La Figure 2.5 synthétise les résultats obtenus sur quelque 380 planches avec la procédure VI (véhicules isolés), pour le cas des véhicules légers. Les résultats sont rassemblés par technique. Chaque point représente le L_{Amax} à 90 km/h d'une planche ; il est le résultat d'une analyse statistique sur les mesures au passage d'au moins 80 véhicules isolés [34]. La figure donne également à droite de ces points la valeur moyenne de la catégorie du revêtement ainsi qu'en vert son écart type.

On constate une forte dispersion des résultats de mesures au sein d'une même technique. On peut néanmoins définir trois catégories de revêtements notées R1 à R3, chaque catégorie regroupant plusieurs techniques de revêtements.

Base de données des revêtements : mesures VI/VI

(L_{Amax}, température de 20°, vitesse 90 km/h)

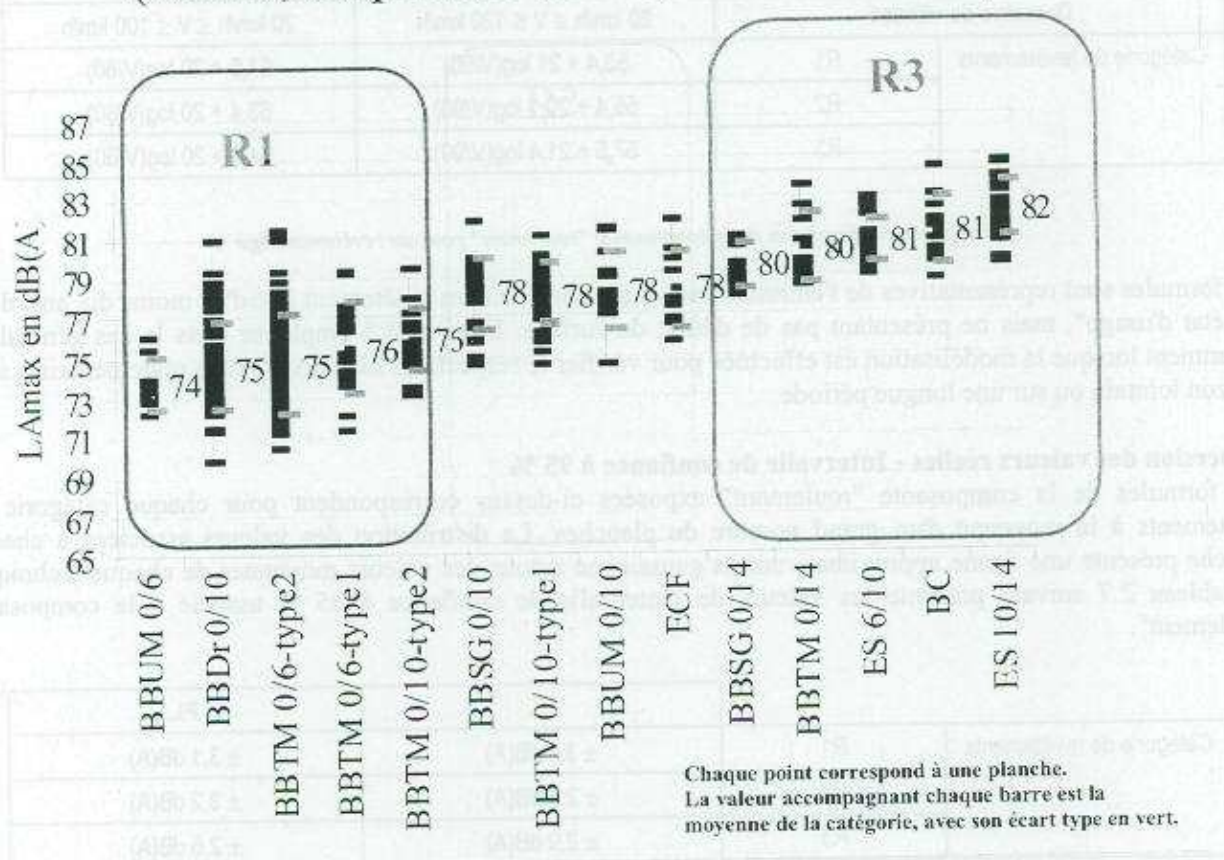


Figure 2.5 - Définition des catégories de revêtements

Les sigles ont la signification suivante :

- BBTM : Béton Bitumineux Très Mince
- BBUM : Béton Bitumineux Ultra Mince
- BBD : Béton Bitumineux Drainant

- BBSG : Béton Bitumineux Semi-Grenu
- ECF : Enrobé Coulé à Froid
- BC : Béton de Ciment
- ES : Enduit Superficiel

La figure 2.5 ne rassemble que les techniques de revêtements pour lesquelles les données disponibles étaient en nombre suffisant pour autoriser une exploitation statistique (cf. troisième partie, chapitre 3.5).

Si un utilisateur souhaite modéliser un site présentant une technique de revêtement ne figurant pas dans cette figure, il déterminera en fonction de la granulométrie, des caractéristiques de surface et de la porosité éventuelle la catégorie susceptible de mieux représenter la technique souhaitée. Les pavés constituent un cas particulier, dans la mesure où l'émission sonore associée est supérieure à celle fixée pour la catégorie R3. Des résultats de mesures pour les pavés sont fournis à titre indicatif en troisième partie de cet ouvrage au chapitre 3.5.

Compte tenu des difficultés de mise en œuvre des revêtements de chaussée, il est utile de préciser que la figure 2.5 n'implique en aucune façon qu'un même type de revêtement utilisé dans deux chantiers différents sera dans les deux cas dans la même catégorie. Ainsi par exemple, le BBUM 0/6 pourra dans certaines situations avoir les caractéristiques d'un revêtement R1, mais aussi dans d'autres situations celles d'un revêtement R2. La classification résulte simplement de l'observation statistique après des mesures acoustiques, qu'illustre la figure ci-dessus, dans laquelle nous pouvons constater qu'il se détache trois catégories de revêtements.

En conséquence, la figure 2.5 ne doit donc pas être considérée comme une référence par la maîtrise d'ouvrage dans le choix d'un revêtement.

2.7.2.2 - Puissance d'émission par mètre de ligne source $Lr_{w/m}$ pour un revêtement âgé

Le tableau 2.6 présente par catégorie de revêtement les formules de $Lr_{w/m}$ pour les VL et les PL ainsi que leur domaine d'emploi en vitesse.

Domaine de vitesse		VL	PL
		20 km/h \leq V \leq 130 km/h	20 km/h \leq V \leq 100 km/h
Catégorie de revêtements	R1	53,4 + 21 log(V/90)	61,5 + 20 log(V/80)
	R2	55,4 + 20,1 log(V/90)	63,4 + 20 log(V/80)
	R3	57,5 + 21,4 log(V/90)	64,2 + 20 log(V/80)

Tableau 2.6 - Formules de la composante "roulement" pour un revêtement âgé

Ces formules sont représentatives de l'émission moyenne associée à un revêtement âgé d'au moins dix ans, donc "en état d'usage", mais ne présentant pas de défaut de surface. Elles sont à employer dans le cas général, et notamment lorsque la modélisation est effectuée pour vérifier le respect des niveaux sonores réglementaires à un horizon lointain ou sur une longue période.

Dispersion des valeurs réelles - Intervalle de confiance à 95 %

Les formules de la composante "roulement" exposées ci-dessus correspondent pour chaque catégorie de revêtements à la moyenne d'un grand nombre de planches. La distribution des valeurs associées à chaque planche présente une forme approximativement gaussienne autour des valeurs moyennes de chaque technique. Le tableau 2.7 suivant présente les valeurs de l'intervalle de confiance à 95 % associé à la composante "roulement".

Catégorie de revêtements		VL	PL
		R1	$\pm 3,4$ dB(A)
	R2	$\pm 2,5$ dB(A)	$\pm 3,2$ dB(A)
	R3	$\pm 2,9$ dB(A)	$\pm 2,5$ dB(A)

Tableau 2.7 - Intervalle de confiance à 95 % associé à la composante "roulement"

La dispersion des valeurs réelles des planches au sein de chaque catégorie de revêtements n'est pas négligeable. L'estimation de la composante roulement d'une planche donnée à partir de la valeur de la catégorie de revêtement peut induire une erreur significative sur les niveaux sonores calculés aux récepteurs par rapport à la valeur réelle.

Dans l'idéal, l'intervalle de confiance à 95 % associé à la composante "roulement" devrait être utilisé, dans le cadre d'un calcul prévisionnel de bruit, pour apprécier l'incertitude associée aux niveaux sonores calculés aux points récepteurs. Cette appréciation serait plus particulièrement utile lorsque le calcul prévisionnel a pour objet de vérifier le respect d'un objectif réglementaire.

Cependant cette appréciation nécessite de combiner les imprécisions associées aux autres éléments du calcul (autres données d'entrée, calculs de propagation, etc.), dont la connaissance n'est à ce jour que très partielle du fait du grand nombre de paramètres en jeu ainsi que de la complexité des phénomènes intervenant dans la propagation. La démarche d'appréciation des incertitudes associées aux résultats des calculs ne sera pas abordée dans le présent ouvrage.

Une approche plus simple, explicitée en deuxième partie au chapitre "Démarche de production des composantes roulement", peut consister à majorer la composante "roulement" par un coefficient de sécurité adapté à la probabilité de dépassement que le maître d'ouvrage juge admissible.

En tout état de cause, la décision quant à une éventuelle majoration de ce type relève du maître d'ouvrage de l'infrastructure modélisée puisque c'est lui qui devra supporter les conséquences d'éventuelles sous-estimations (induisant un non-respect des exigences réglementaires) comme d'éventuelles surestimations (pouvant conduire à un surdimensionnement des protections acoustiques sur le site).

2.7.2.3 - Puissance d'émission par mètre de ligne source $Lr_{w/m}$ en fonction de l'âge du revêtement

Lorsque l'étude vise à modéliser un site comportant un revêtement d'âge inférieur à dix ans, la puissance d'émission par mètre de ligne source $Lr_{w/m}$ est corrigée par le terme $\Delta Lr_{w/m}$ défini dans le tableau 2.8.

Age du revêtement		VL		PL	
		≤ 2 ans	2 à 10 ans	≤ 2 ans	2 à 10 ans
Catégorie de revêtements	R1	-4	0,5.(a-10)	-2,4	0,3.(a-10)
	R2	-2	0,25.(a-10)	-1,2	0,15.(a-10)
	R3	-1,6	0,2.(a-10)	-1	0,12.(a-10)

Tableau 2.8 - Correctif $\Delta Lr_{w/m}$ en dB(A), en fonction de l'âge du revêtement, noté a, en années.

Dispersion des valeurs réelles - Intervalle de confiance à 95 %

Les valeurs citées au chapitre précédent sont valables quel que soit l'âge du revêtement.

2.7.2.4 - Possibilité d'utiliser d'autres valeurs de la composante "roulement"

La méconnaissance des caractéristiques acoustiques réelles de la planche à modéliser peut induire une erreur significative sur les niveaux sonores calculés aux récepteurs. Afin de réduire ce risque, il est admis, sous certaines conditions, d'utiliser une valeur de la composante "roulement" différente des formules définies précédemment. Ces conditions sont les suivantes :

- la modélisation doit porter sur une situation existante : la planche existe et aucune projection dans le temps n'est effectuée (ceci correspond typiquement à l'évaluation d'un état initial) ;
- des résultats de mesures de bruit des véhicules au passage, réalisées **sur la même planche** selon les normes en vigueur, sont disponibles pour les VL et les PL ou à défaut, pour les VL seuls. Les "trains routiers" (poids lourds d'au moins 4 essieux) définis par la norme S 31-119 seront considérés ici représentatifs de l'ensemble des poids lourds ;
- la modélisation est représentative de la date à laquelle les mesures au passage ont été réalisées.

Si ces conditions sont respectées, la composante "roulement" des VL et des PL sur le site étudié peut être évaluée selon la démarche décrite en troisième partie de cet ouvrage au chapitre 3.5. Ces valeurs seront produites sous la seule responsabilité de l'opérateur et devront être justifiées dans le rapport d'étude, notamment par une référence au procès-verbal d'essai des mesures exploitées.

2.7.3 - Composante "moteur"

La composante "moteur" $Lm_{w/m}$ est fonction de l'allure et de la vitesse des véhicules, ainsi que, pour les PL, de la déclivité de la route.

- Pour l'allure on distingue trois cas : allure stabilisée, accélération ou décélération. L'accélération n'est prise en compte que par cette approche qualitative, non de façon quantifiée.

La condition d'allure stabilisée ne s'applique que pour une vitesse minimale de 20 km/h. On rappelle également qu'en situation d'accélération et de décélération, la décomposition en composantes moteur et roulement n'est pratiquée que pour les vitesses supérieures à 25 km/h.

- Pour la déclivité on distingue trois cas : route horizontale (déclivité inférieure à 2 %), montée (déclivité de 2 % à 6 %), descente (déclivité de 2 % à 6 %). En montée et en descente la déclivité intervient de façon quantitative dans le calcul de la composante "moteur" des PL. Les déclivités supérieures à 6 % ne sont pas traitées par la présente méthode. Dans le domaine de la méthode, la déclivité n'a pas d'influence sur la composante "moteur" des VL.

Remarque : la déclivité de la route influe de deux façons sur le bruit émis : d'une part en modifiant la vitesse des véhicules, d'autre part à vitesse donnée en modifiant la composante "moteur". Le premier effet est abordé au chapitre 3.6. Seul le second effet est abordé ici.

Pour chaque configuration qui suit sont présentés les formules permettant de calculer la composante "moteur" $L_{m_w/m}$ en fonction de la vitesse, puis pour information un graphé illustrant la valeur de $L_{w/m}$ qui en résulte par combinaison avec les trois catégories de revêtements pour une planche âgée.

2.7.3.1 - VL en allure stabilisée (toutes déclivités, $V \geq 20$ km/h)

V - km/h	$L_{m_w/m}$
20 à 30	$36,7 - 10 \log(V/90)$
30 à 110	$42,4 + 2,0 \log(V/90)$
110 à 130	$40,7 + 21,3 \log(V/90)$

Tableau 2.9 - Formules de la composante "moteur" pour les VL en allure stabilisée.

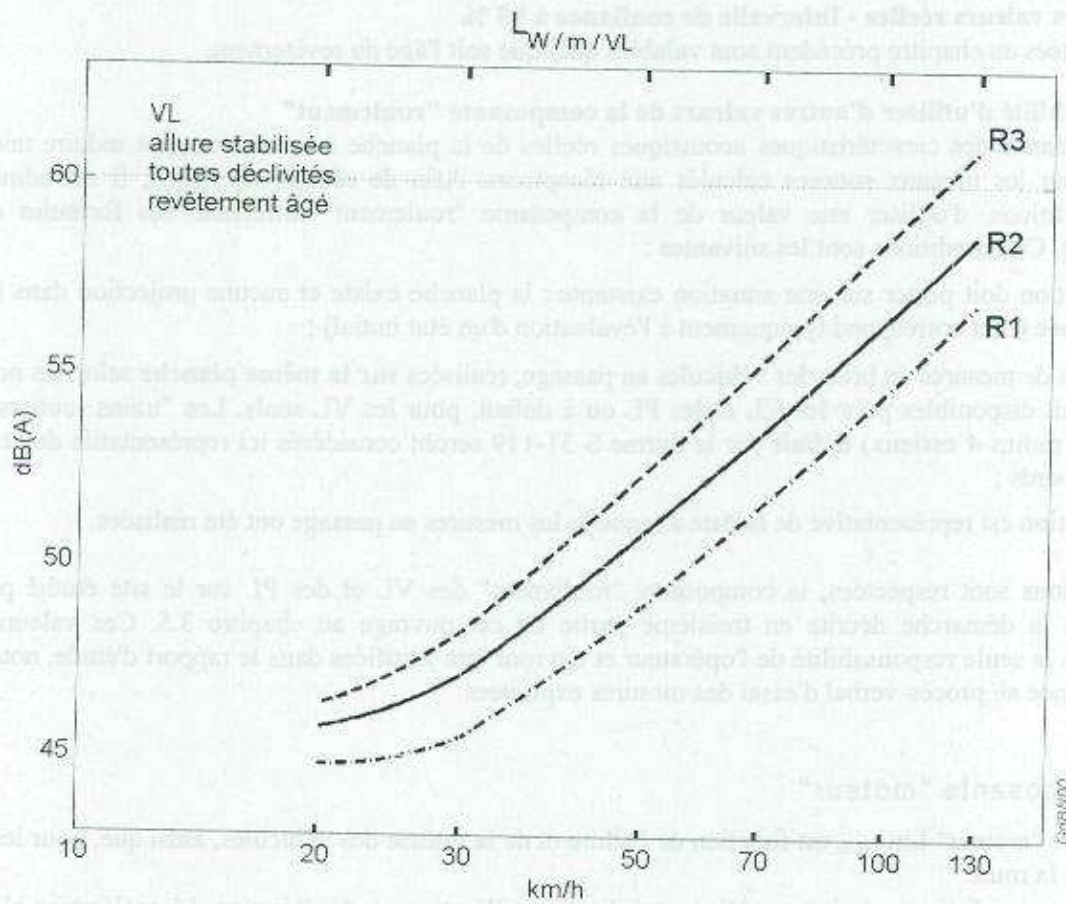


Figure 2.10 - $L_{w/m}$ pour les VL en allure stabilisée, sur un revêtement âgé

2.7.3.2 - VL en accélération (toutes déclivités, $V \geq 25$ km/h)

V - km/h	$L_{m_w/m}$
25 à 100	$46,1 - 10 \log(V/90)$
100 à 130	$44,3 + 28,6 \log(V/90)$

Tableau 2.11 - Formules de la composante "moteur" pour les VL en accélération

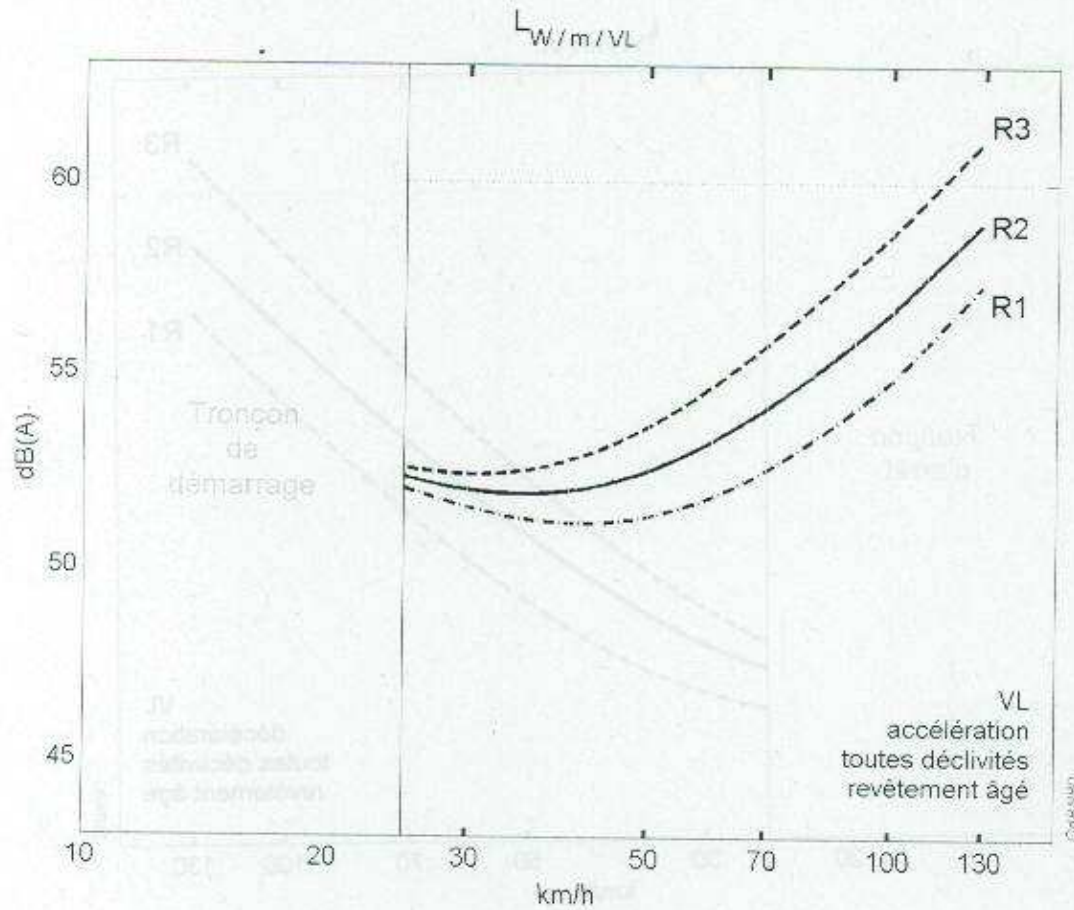


Figure 2.12 - $L_{w/m}$ pour les VL en accélération, sur un revêtement âgé

2.7.3.3 - VL en décélération (toutes déclivités, $V \geq 25$ km/h)

V - km/h	$L_{m, w/m}$
25 à 80	$42,1 - 4,5 \log(V/90)$
80 à 110	$42,4 + 2 \log(V/90)$
110 à 130	$40,7 + 21,3 \log(V/90)$

Tableau 2.13 - Formules de la composante "moteur" pour les VL en décélération

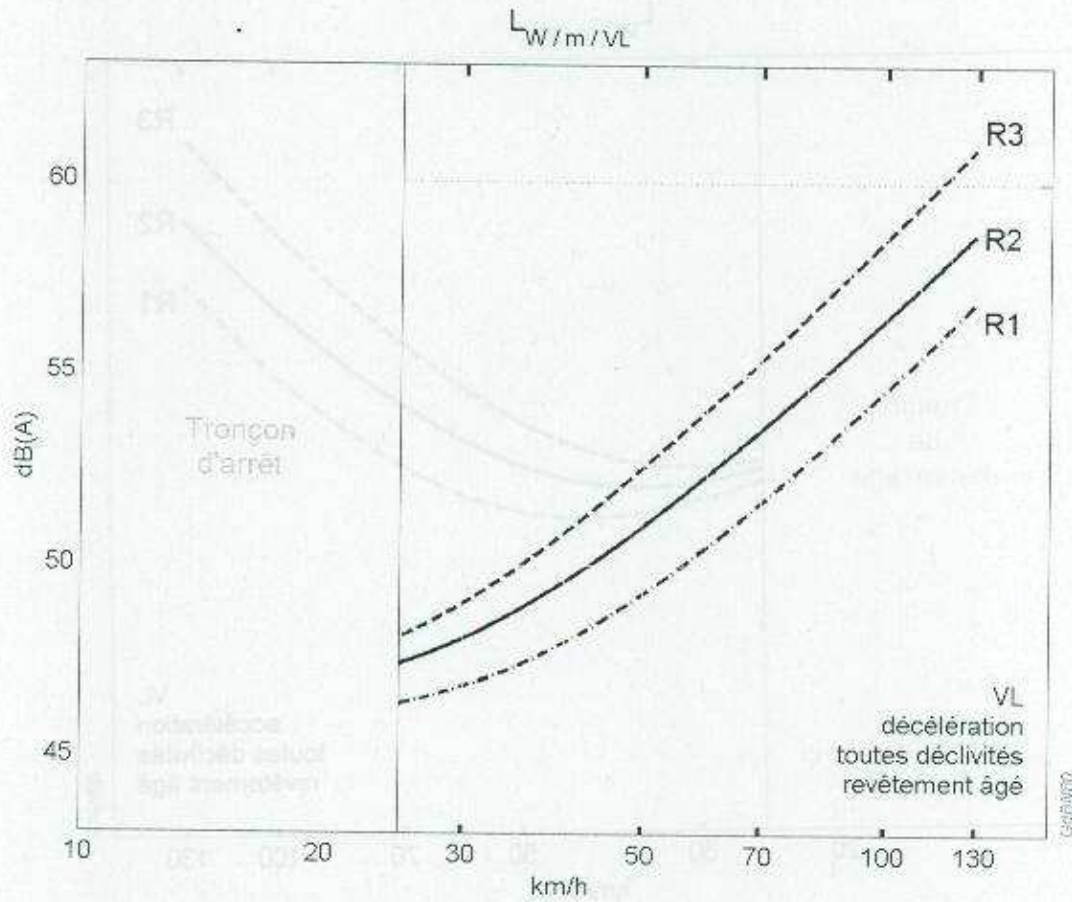


Figure 2.14 - $L_{w/m}$ pour les VL en décélération, sur un revêtement âgé

2.7.3.4 - PL, toutes allures et toutes déclivités

Les formules permettant de calculer $L_{m_w/m}$ pour les PL sont plus simples que pour les VL (tableau 2.15). Pour les différentes conditions d'allure et de déclivité, elles sont obtenues à partir des formules relatives à l'allure stabilisée sur route horizontale par simple ajout d'un correctif $\Delta L_{m_w/m}$ indépendant de la vitesse (tableau 2.16).

V - km/h	$L_{m_w/m}$
20 à 70*	$49,6 - 10 \log(V/80) + \Delta L_{m_w/m}$
70 à 100	$50,4 + 3 \log(V/80) + \Delta L_{m_w/m}$

* Rappel : les allures en accélération et décélération ne s'appliquent que pour une vitesse supérieure ou égale à 25 km/h.

Tableau 2.15 - Formules de la composante "moteur" pour les PL.

$\Delta L_{m_w/m}$ est détaillé dans le tableau 2.16.

	déclivité		
	$0\% \leq p \leq 2\%$	montée $2\% \leq p \leq 6\%$	descente $2\% \leq p \leq 6\%$
allure stabilisée	0 dB(A)	$2.(p-2)$	$1.(p-2)$
accélération	5 dB(A)	$5 + \max[2.(p-4,5) ; 0]$	5 dB(A)
décélération	0 dB(A)	0 dB(A)	$1.(p-2)$

p en % (valeur absolue)

Tableau 2.16 - Valeurs du correctif $\Delta L_{m_w/m}$

Les figures 2.17 à 2:21 illustrent pour les configurations simples la valeur de $L_{w/m}$ qui en résulte par combinaison avec les trois catégories de revêtements pour une planche âgée.

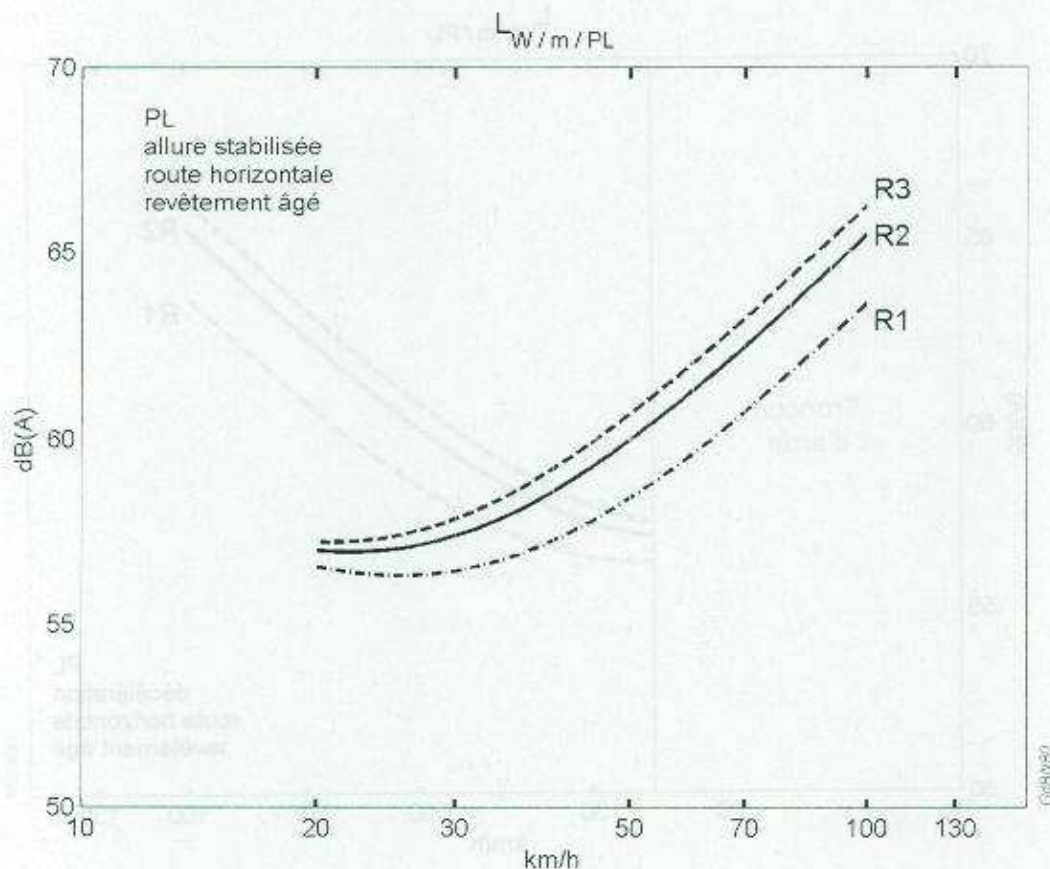


Figure 2.17 - $L_{w/m}$ pour les PL en allure stabilisée sur route horizontale, sur un revêtement âgé

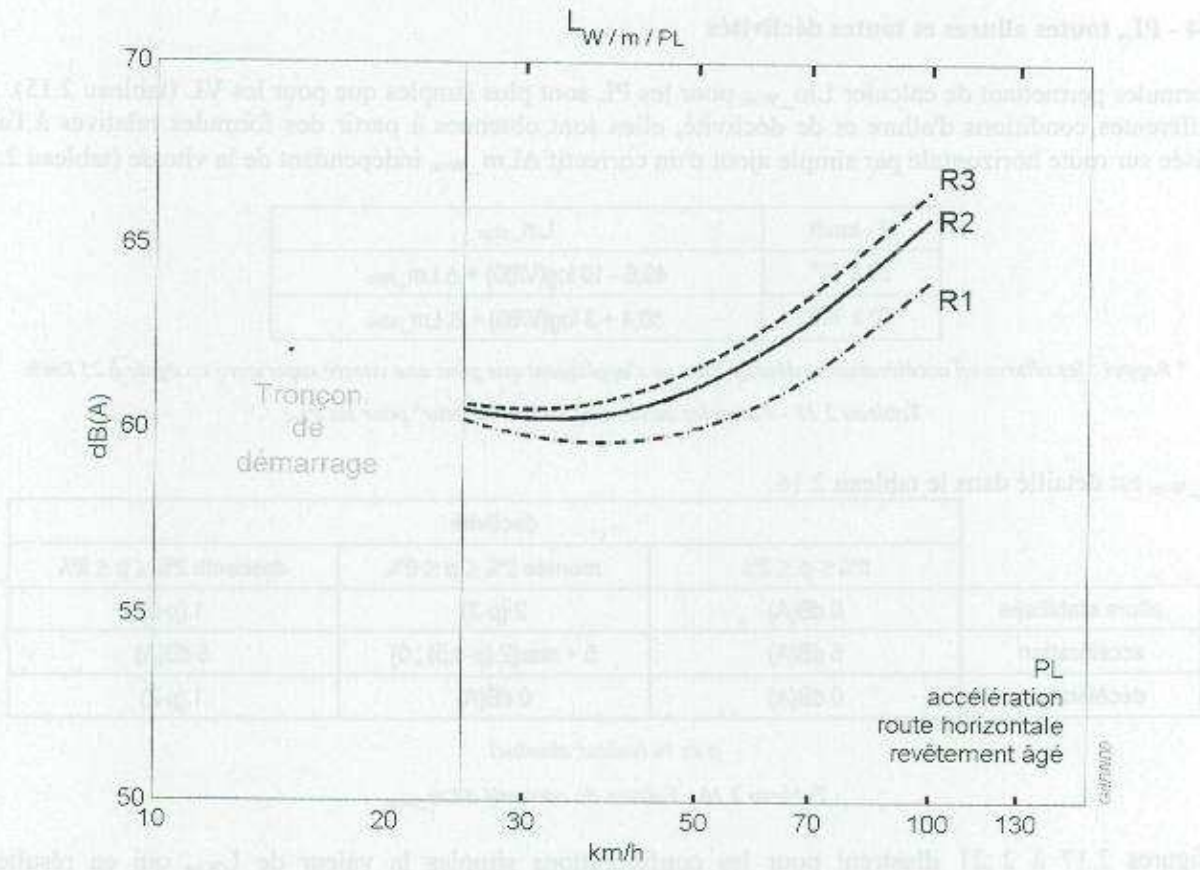


Figure 2.18 - $L_{w/m}$ pour les PL en accélération sur route horizontale, sur un revêtement âgé

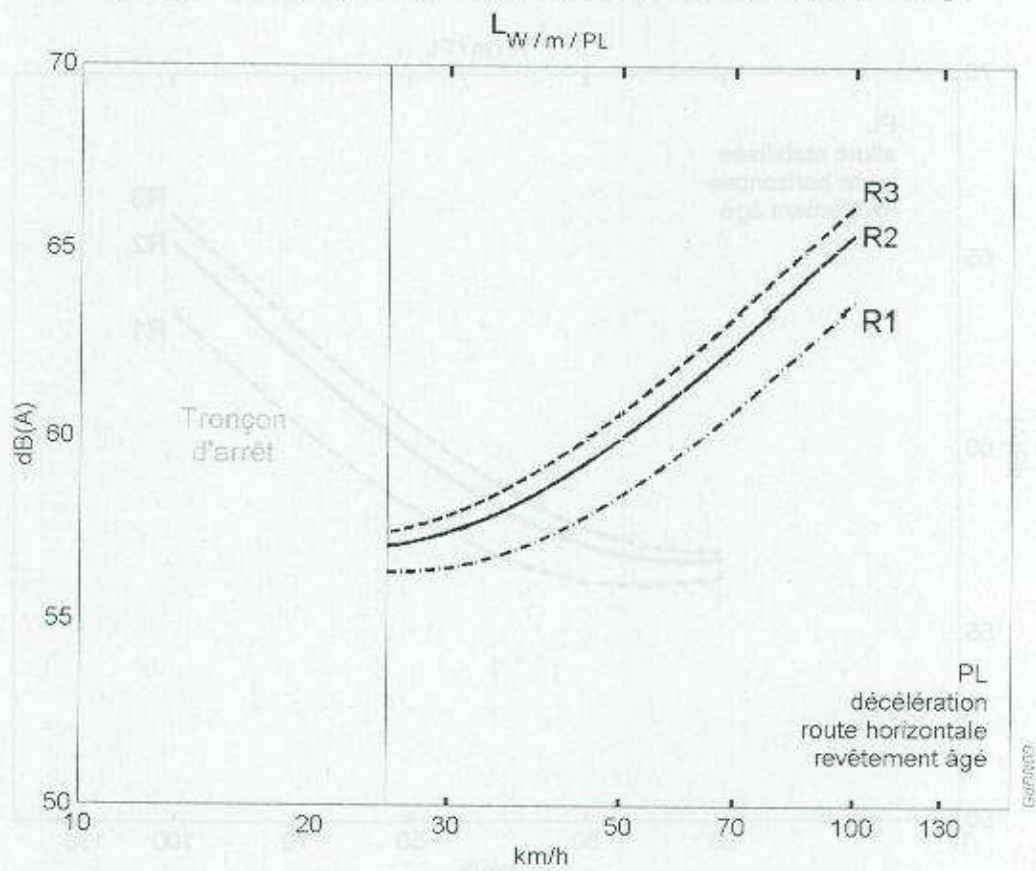


Figure 2.19 - $L_{w/m}$ pour les PL en décélération sur route horizontale, sur un revêtement âgé

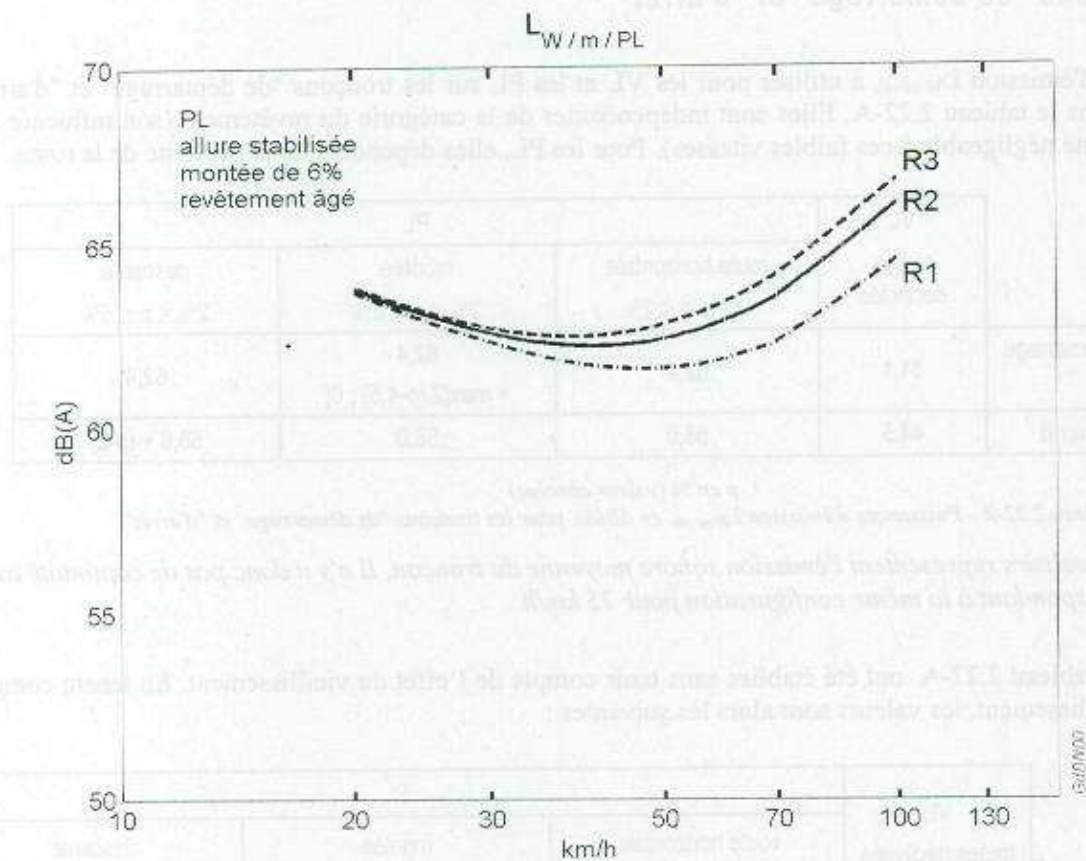


Figure 2.20 - $L_{w/m}$ pour les PL à vitesse stabilisée en montée de 6 %, sur un revêtement âgé

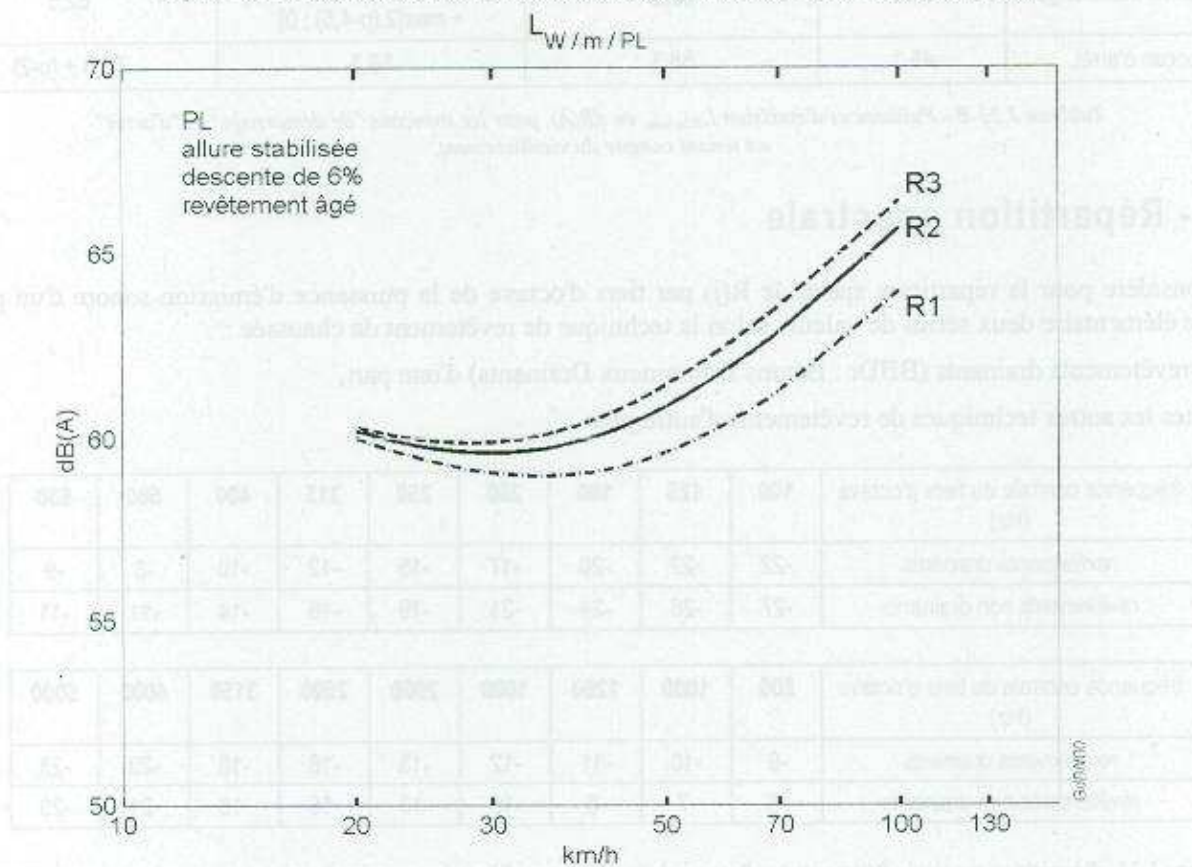


Figure 2.21 - $L_{w/m}$ pour les PL à vitesse stabilisée en descente de 6 %, sur un revêtement âgé

2.7.4 - Tronçons "de démarrage" et "d'arrêt"

Les puissances d'émission $L_{W(m),veh}$ à utiliser pour les VL et les PL sur les tronçons "de démarrage" et "d'arrêt" sont définies dans le tableau 2.22-A. Elles sont indépendantes de la catégorie du revêtement (son influence est considérée comme négligeable à ces faibles vitesses). Pour les PL, elles dépendent de la déclivité de la route.

	VL toutes déclivités	PL		
		route horizontale $0\% \leq p \leq 2\%$	montée $2\% \leq p \leq 6\%$	descente $2\% \leq p \leq 6\%$
tronçon de démarrage	51,1	62,4	62,4 + $\max[2 \cdot (p-4,5); 0]$	62,4
tronçon d'arrêt	44,5	58,0	58,0	58,0 + (p-2)

p en % (valeur absolue)

Tableau 2.22-A - Puissances d'émission $L_{W(m),veh}$ en dB(A), pour les tronçons "de démarrage" et "d'arrêt".

Remarque : ces valeurs représentent l'émission sonore moyenne du tronçon. Il n'y a donc pas de continuité avec les valeurs correspondant à la même configuration pour 25 km/h.

Les valeurs du tableau 2.22-A ont été établies sans tenir compte de l'effet du vieillissement. En tenant compte de l'effet du vieillissement, les valeurs sont alors les suivantes :

	VL toutes déclivités	PL		
		route horizontale $0\% \leq p \leq 2\%$	montée $2\% \leq p \leq 6\%$	descente $2\% \leq p \leq 6\%$
tronçon de démarrage	51,3	62,5	62,5 + $\max[2 \cdot (p-4,5); 0]$	62,5
tronçon d'arrêt	45,1	58,3	58,3	58,3 + (p-2)

Tableau 2.22-B - Puissances d'émission $L_{W(m),veh}$ en dB(A), pour les tronçons "de démarrage" et "d'arrêt" en tenant compte du vieillissement.

2.8 - Répartition spectrale

On considère pour la répartition spectrale $R(j)$ par tiers d'octave de la puissance d'émission sonore d'un point source élémentaire deux séries de valeurs selon la technique de revêtement de chaussée :

- les revêtements drainants (BBDr : Bétons Bitumineux Drainants) d'une part,
- toutes les autres techniques de revêtements d'autre part.

fréquence centrale du tiers d'octave (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630
revêtements drainants	-22	-22	-20	-17	-15	-12	-10	-8	-9
revêtements non drainants	-27	-26	-24	-21	-19	-16	-14	-11	-11

fréquence centrale du tiers d'octave (Hz)	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
revêtements drainants	-9	-10	-11	-12	-13	-16	-18	-20	-23
revêtements non drainants	-8	-7	-8	-10	-13	-16	-18	-21	-23

Tableau 2.23 - Répartition spectrale $R(j)$ par tiers d'octave de la puissance d'émission sonore d'un point source élémentaire, en dB(A)

La somme énergétique des valeurs correspondant aux 18 tiers d'octave est égale à 0 dB(A).

3 – Commentaires et analyses

3.1 - Introduction

La deuxième partie de cet ouvrage rassemble tous les éléments et commentaires que les auteurs ont jugé utile de fournir en accompagnement de la méthode de calcul proprement dite. Il s'agit notamment :

- de l'origine et de la justification des formules et des valeurs adoptées, et de leurs limites éventuelles ;
- des enjeux acoustiques associés aux différents paramètres ;
- des modifications intervenues par rapport à la pratique antérieure (Guide du Bruit des Transports Terrestres [3], autres documents) ;
- de réflexions plus générales sur l'état des connaissances relatives aux différents facteurs, et sur les travaux nécessaires pour une éventuelle version future de la méthode de prévision du bruit routier.

Cette partie est organisée autant que possible selon une structure similaire à la première partie. Seront ainsi successivement abordés :

- les hypothèses de débit des véhicules (chap. 3.2),
- les hypothèses de vitesses et d'allure (chap. 3.3),
- les valeurs d'émission unitaires $L_{W/mv\acute{e}h}$ (chap. 3.4 à 3.9),
- la répartition spectrale (chap. 3.10).

Les valeurs d'émission unitaires sont traitées en plusieurs chapitres décrivant tout d'abord la démarche générale de production des valeurs d'émission unitaires (chap. 3.4), puis plus spécifiquement les démarches de production des composantes roulement (chap. 3.5) et des composantes moteur VL (chap. 3.6) puis PL (chap. 3.7). Les chapitres 3.8 et 3.9 apportent enfin des commentaires sur les enjeux associés à ces valeurs, et les comparent à celles publiées dans le Guide du Bruit.

3.2 - Hypothèses de débit

3.2.1 - Enjeux associés

Le profil journalier du trafic est très variable selon la catégorie de véhicules et selon la catégorie d'infrastructure. La figure 3.1 représente à titre d'illustration, pour un échantillon de 249 sites sur routes nationales (RN), la part moyenne du trafic de chaque tranche horaire dans le trafic journalier, séparément pour les VL et les PL.

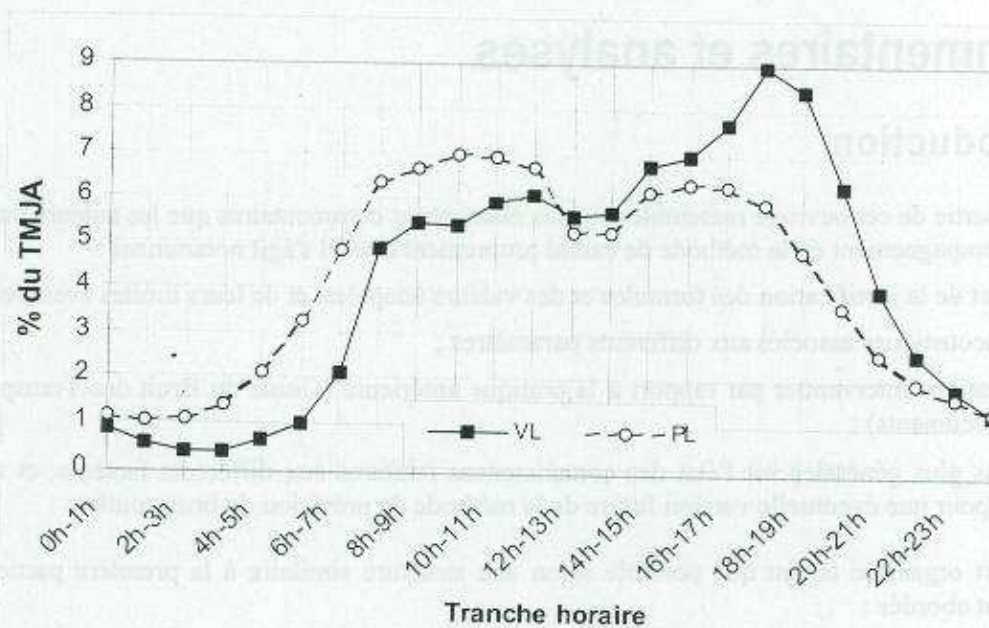


Figure 3.1 - Profils moyens journaliers de trafic VL et PL sur RN par tranche horaire

Seuls les VL sont sujets à une pointe en fin d'après-midi, celle-ci s'achevant dès 19 h. Le trafic PL est plus régulier au cours de la journée et décroît dès 18 h. En revanche, les PL circulent proportionnellement plus la nuit que les VL.

Ainsi, le sondage de circulation effectué sur le réseau national interurbain en 1996-97 [8] a montré qu'en moyenne :

- sur les routes nationales, 7 % des VL et 14 % des PL circulent la nuit (entre 22 h et 6 h). La part des PL dans le trafic total est ainsi deux fois plus élevée la nuit (22 %) qu'entre 6 h et 22 h (11 %) ;
- sur les autoroutes, cette tendance est encore plus forte : 9 % des VL et 18 % des PL circulent la nuit. La proportion de PL dans le trafic total, égale à 14 % entre 6 h et 22 h, s'élève à 25 % la nuit.

En outre, il existe autour de ces moyennes de grandes disparités entre les axes de même catégorie administrative. Sur le réseau autoroutier, la proportion de PL la nuit varie de 8 % à plus de 40 % selon les sites. Sur route nationale, pour des TMJA du même ordre, deux sites peuvent supporter des débits PL nocturnes variant du simple au triple.

La connaissance des seuls trafics journaliers (24 h) de VL et de PL et de la catégorie de route n'est donc pas suffisante pour estimer correctement les niveaux sonores nocturnes. Cette variabilité peut être réduite par une analyse de la **fonction de la route**. En effet, il apparaît pour les axes interurbains que le trafic nocturne est lié à l'importance du trafic de transit : une route remplissant principalement une fonction de transit de longue distance (trajets inter-régionaux, voire internationaux) supporte un trafic de nuit proportionnellement plus important qu'une route utilisée pour des déplacements de courte distance (trajets domicile-travail, livraisons de proximité, etc.).

Ainsi, une étude acoustique qui méconnaîtrait le fonctionnement particulier de l'infrastructure en période nocturne risquerait de sous-estimer fortement les niveaux de bruit et de commettre ainsi une erreur très préjudiciable.

3.2.2 - Démarche générale d'estimation des débits moyens horaires à partir des TMJA

Les débits de véhicules par période peuvent être soit déterminés à partir de comptages, soit estimés par l'application de formules.

Le recours à des comptages pour évaluer la répartition journalière des trafics VL et PL n'est matériellement possible que pour l'étude d'une infrastructure existante. Par ailleurs, cette démarche peut dans certaines situations s'avérer très lourde et d'un coût disproportionné au regard des enjeux de l'étude, notamment lorsque le réseau étudié est étendu. Les comptages ne sauraient donc constituer une solution systématique.

C'est pourquoi les estimations des trafics sur les différentes périodes ont été établies à partir d'analyses statistiques ; elles sont présentées en partie 2 de cet ouvrage aux chapitres 2.4.2 et 2.4.3. Ces estimations sont fondées sur les valeurs moyennes obtenues pour chacun des sous-échantillons de sites exploités.

Le choix de la démarche à appliquer pour évaluer les trafics VL et PL sur les différentes périodes sera donc fonction du contexte de l'étude. Quelle que soit la démarche retenue, **il est recommandé de prendre systématiquement, pour sa mise en oeuvre, le conseil d'un spécialiste des études de trafic.**

De façon générale, la réalisation et l'exploitation de comptages spécifiques par périodes ne sont recommandées que pour les besoins d'une étude détaillée, c'est-à-dire portant sur un axe déterminé et une zone localisée. Il est rappelé que ces comptages doivent obligatoirement distinguer VL et PL. L'attention est également attirée sur le fait que les profils de trafics (notamment de soirée et de nuit) présentent une certaine variabilité selon les jours de la semaine. La définition des modalités de comptage doit donc impérativement associer un spécialiste des études de trafic, afin d'assurer une représentativité suffisante vis-à-vis de la moyenne annuelle.

Ces comptages peuvent alors être exploités non seulement pour l'évaluation de la situation actuelle, mais aussi pour l'évaluation d'une situation future, si l'étude concerne un aménagement sur place (élargissement, projet de protections acoustiques, etc.) ou une déviation de faible longueur, sous réserve que l'étude prévisionnelle de trafic n'ait pas mis en évidence de modification de la fonction de la route. Pour l'évaluation d'une situation future, la répartition journalière observée pour chacune des catégories de véhicules est alors appliquée au TMJA de l'horizon de prévision.

Lorsque l'étude consiste à prévoir le bruit d'une route nouvelle, ou d'une route existante dont la fonction sera modifiée, l'analyse doit distinguer et traiter séparément :

- d'une part le trafic lié à des établissements locaux (grande zone industrielle, centre commercial important, etc.) susceptibles de générer une part substantielle de la circulation (notamment de poids lourds) prévue sur l'itinéraire. L'étude prévisionnelle de trafic doit comprendre une analyse du fonctionnement de ces générateurs selon les différentes périodes ;
- d'autre part le trafic dont les origines et les destinations sont "diffuses" ou lointaines, lié au fonctionnement général d'une agglomération ou d'un itinéraire : sa répartition entre les différentes périodes peut être estimée comme exposée aux chapitres 2.4.2 et 2.4.3.

L'utilisation des formules est également recommandée pour les études macroscopiques portant sur un réseau étendu, dont l'enjeu ne justifie généralement pas la réalisation de comptages spécifiques, excepté sur quelques axes bien identifiés.

3.2.3 - Origine des formules pour les axes interurbains

Les formules définies pour l'estimation de la répartition des trafics VL et PL sur les quatre périodes 6h-22h, 6h-18h, 18h-22h et 22h-6h sont celles publiées dans la note d'information du Sétra série EEC n°77 [7] (cf. annexe 3).

Cette note précise également le domaine d'emploi des formules, l'intervalle de confiance associé, et décrit l'échantillon de sites qui a été exploité pour aboutir à ces formules. Pour une connaissance de ces éléments, le lecteur est renvoyé à ce document.

3.2.4 - Origine des formules pour les axes urbains

Pour les axes urbains, les valeurs présentées au chapitre 2.4.3 sont issues de l'exploitation d'une base de données trafic du Certu. Cette base de données a été constituée entre 2000 et 2005 et alimentée par des données issues de comptage en milieu urbain, réalisés pour d'autres objectifs. On dispose ainsi de campagnes de mesures réalisées sur 200 sites réparties sur 34 communes du territoire français, principalement dans les grandes agglomérations.

Une première exploitation de ces données réalisée en 2005 a permis d'analyser les données recueillies et de produire les données décrites.

Les valeurs proposées montrent une variation importante du pourcentage de poids lourd sur les voies rapides urbaines de jour comme de nuit et une variation relative très importante du pourcentage de trafic nocturne tous véhicules par rapport au trafic total.

Or ce sont précisément ces grandeurs pour lesquelles l'enjeu est le plus important. Ces éléments ne permettent donc pas à ce jour de proposer des formules de passage. Un affinage des paramètres affectant ces pourcentages est nécessaire pour permettre d'expliquer ces variations importantes.

3.2.5 - Débit horaire équivalent de l'émission sonore maximale du flot

3.2.5.1 - Notion de débit équivalent de l'émission sonore maximale du flot

Le calcul du niveau de puissance acoustique émis par mètre de plate-forme $L_{w/m}$ nécessite la connaissance des débits et des vitesses pour chaque catégorie de véhicules. Ces deux types de données sont interdépendantes : un débit élevé induit des contraintes sur l'écoulement du flot, qui se traduisent par une baisse des vitesses pratiquées. L'augmentation du débit et la diminution des vitesses qui en résulte ont des effets contraires sur l'émission sonore, de sorte que celle-ci atteint une valeur maximale pour un débit inférieur à la capacité de la chaussée. Cette situation est communément appelée "saturation acoustique".

Par simplicité, les calculs prévisionnels de bruit sont fondés, pour chaque catégorie de véhicules, sur une hypothèse de vitesse égale à la "vitesse libre" ou "vitesse à vide" (c'est-à-dire la vitesse pratiquée lorsque le débit est très faible et n'induit pas de contrainte sur l'écoulement), et non sur les vitesses réelles qui dépendent du débit. Ce principe induit une surestimation de la puissance d'émission sonore du flot inévitable sauf à introduire directement des lois débits-vitesses dans le modèle de prévision.

Afin que la puissance d'émission sonore résultant des calculs prévisionnels ne dépasse pas celle observable en situation de saturation acoustique, on plafonne les hypothèses de débit utilisés

Pour une proportion de poids lourds donnée, notée %PL, on appelle débit équivalent de l'émission sonore maximale du flot Q_{TV_equiv} la valeur du débit tous véhicules qui donnerait, pour la même valeur de %PL et pour les vitesses à vide VL et PL, la puissance d'émission sonore maximale correspondant à la situation de saturation acoustique.

3.2.5.2 - Origine des formules pour les autoroutes interurbaines

Les formules pour les autoroutes interurbaines sont issues d'une étude conduite par le Sétra [9] et fondée sur des relations entre débits et temps de parcours publiées précédemment [10].

Cette étude a schématiquement procédé comme suit :

1) Pour de nombreuses hypothèses de débit tous véhicules (de 600 à 4500 véh/h pour une chaussée de 3 voies, et de 400 à 3000 véh/h pour une chaussée de 2 voies) et de proportion de PL (de 0 à 35 %) :

- calcul des temps de parcours associés, puis des vitesses moyennes correspondantes, par application des relations débits - temps de parcours ;
- calcul de la puissance d'émission sonore pour un débit unitaire de chaque catégorie de véhicules, au moyen des formules présentées en deuxième partie du présent ouvrage, pour les trois catégories de revêtements de chaussée ;

- calcul de la puissance d'émission sonore par mètre de plate-forme pour les hypothèses de trafic fixées, et ce pour les trois catégories de revêtements de chaussée.

2) Pour chaque catégorie de revêtements et chaque valeur de %PL :

- on relève la valeur maximale de la puissance d'émission sonore rencontrée sur la plage de débits Q_{TV} étudiée :
- on calcule ensuite le débit équivalent de l'émission maximale du flot Q_{TV_equiv} qui donnerait, pour la même valeur du %PL et pour les vitesses à vide VL et PL, cette puissance d'émission sonore maximale.

3) Enfin, on recherche une formule générale permettant d'exprimer Q_{TV_equiv} en fonction de %PL. Les figures 3.2 (autoroute à 2 voies) et 3.3 (autoroute à 3 voies) ci-dessous présentent la variation de Q_{TV_equiv} en fonction du %PL pour chaque catégorie de revêtements. La représentation graphique des résultats obtenus montre que les courbes relatives aux catégories de revêtements R1 et R2 sont presque confondues. Pour la catégorie R3, le débit équivalent de l'émission sonore maximale du flot est légèrement plus faible, de l'ordre de 100 véh/h, pour les proportions de PL élevées.

Considérant que les revêtements de catégorie R3 sont peu répandus sur les autoroutes à fort trafic, la relation recherchée a été établie à partir des catégories R1 et R2.

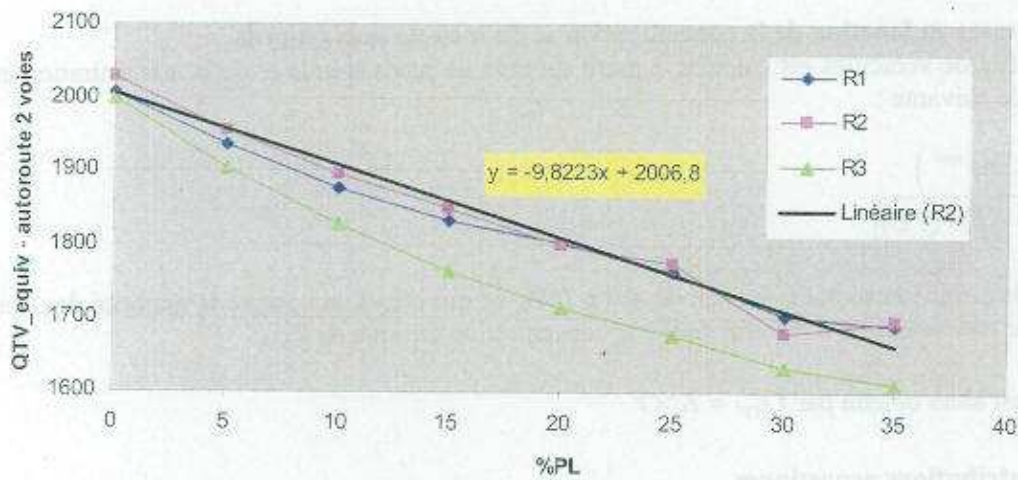


Figure 3.2 - Variation de Q_{TV_equiv} en fonction du %PL pour chaque catégorie de revêtements - autoroute à 2 voies

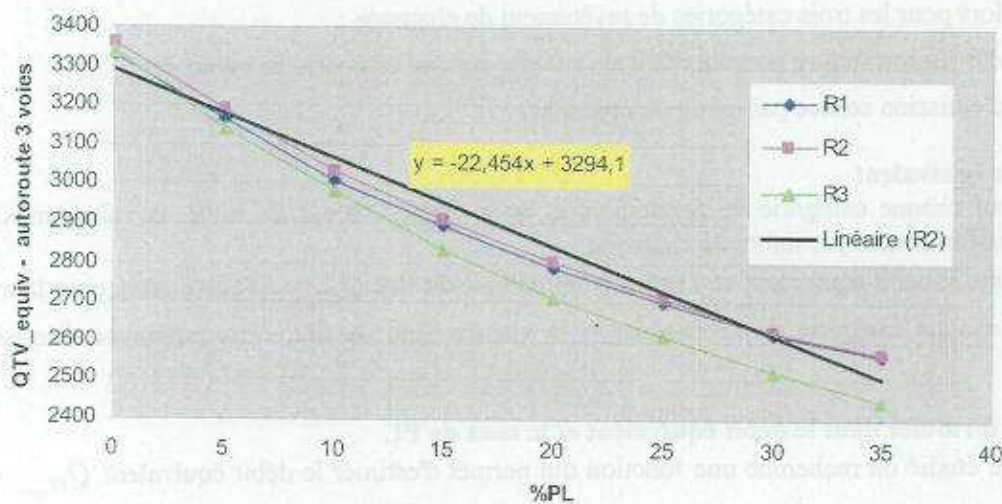


Figure 3.3 - Variation de Q_{TV_equiv} en fonction du %PL pour chaque catégorie de revêtements - autoroute à 3 voies

3.2.5.3 - Origine des formules pour les voies rapides urbaines

Les formules pour les voies rapides urbaines sont établies à partir de jeux de données trafic sur 17 sites réels de typologies allant de 2x2 à 2x5 voies et des formules statistiques issus du rapport du Certu à paraître "Niveaux de service de circulation des voies rapides urbaines de type A".

La méthodologie adoptée se décline comme suit. Elle est détaillée dans le rapport du Certu à paraître "Approche de l'émission acoustique maximum sur VRU de type A".

Choix d'une courbe débit/vitesse

Pour chaque axe considéré, on calibre une courbe débit/vitesse à partir des paramètres a, b et alpha donnés dans le rapport cité en référence.

De plus, sur ces courbes on travaille uniquement sur la partie en circulation fluide, les allures des véhicules au-delà de la capacité n'étant pas connues.

Tous les sites sont utilisés, sauf celui de Paris A1 car les mesures ont été réalisées à capacité, c'est à dire dans des conditions de trafic non fluide.

Les calculs sont réalisés à partir de formules théoriques, en prenant une équivalence trafic VL/PL Cvp égale à 2 et les %PL fournis par le document cité précédemment.

Calcul des vitesses en fonction de la concentration et du taux de poids lourds

La vitesse du flot de véhicules est calculée à partir du taux de poids lourds et de la concentration en véhicules selon la formule suivante :

$$V = \frac{(a \times e^{-b \times K^{alpha}})}{[1 + (Cvp - 1) \times (PL)]} \quad (20)$$

avec un taux de poids lourds %PL variant de 0% à 20%, ce qui prend en compte la majorité des cas rencontrés sur VRU et une concentration K variant de 0 à la concentration critique de l'axe.

$$\text{Le débit total est alors obtenu par } Q_{TV} = K \times V \quad (21)$$

Calcul des contributions acoustiques

En l'absence d'information permettant de différencier les vitesses des deux catégories de véhicules, on prend pour hypothèse que la vitesse des VL est égale à la vitesse des PL et égale à la vitesse du flot de véhicules.

On détermine alors pour les trois catégories de revêtement de chaussée :

- la puissance d'émission sonore pour un débit unitaire de chaque catégorie de véhicules ;
- la puissance d'émission sonore par mètre de chaussée.

Calcul du débit équivalent

On identifie pour chaque catégorie de revêtement et pour chaque valeur de %PL, la valeur maximale de la puissance d'émission sonore par mètre de chaussée.

On calcule ensuite le débit équivalent de l'émission maximale du flot $Q_{TV_{max}}$ qui donnerait, pour la même valeur du %PL, pour chaque catégorie de revêtement et la vitesse libre du flot, cette puissance d'émission sonore maximale.

Recherche des formules liant le débit équivalent et le taux de PL

Pour chaque site étudié on recherche une fonction qui permet d'estimer le débit équivalent $Q_{TV_{max}}$ en fonction du %PL.

La figure 3.4 ci-dessous représente la variation du débit équivalent en fonction du %PL pour chaque catégorie de revêtement pour un site particulier. On constate alors que les valeurs pour la catégorie de revêtement R3 sont

significativement plus faibles que pour les catégories R1 et R2. Les revêtements de la catégorie R3 étant en outre peu représentés et en voie de remplacement sur les VRU, on choisit de se baser uniquement sur les valeurs des catégories de revêtements R1 et R2 pour rechercher la fonction liant débit équivalent et %PL.

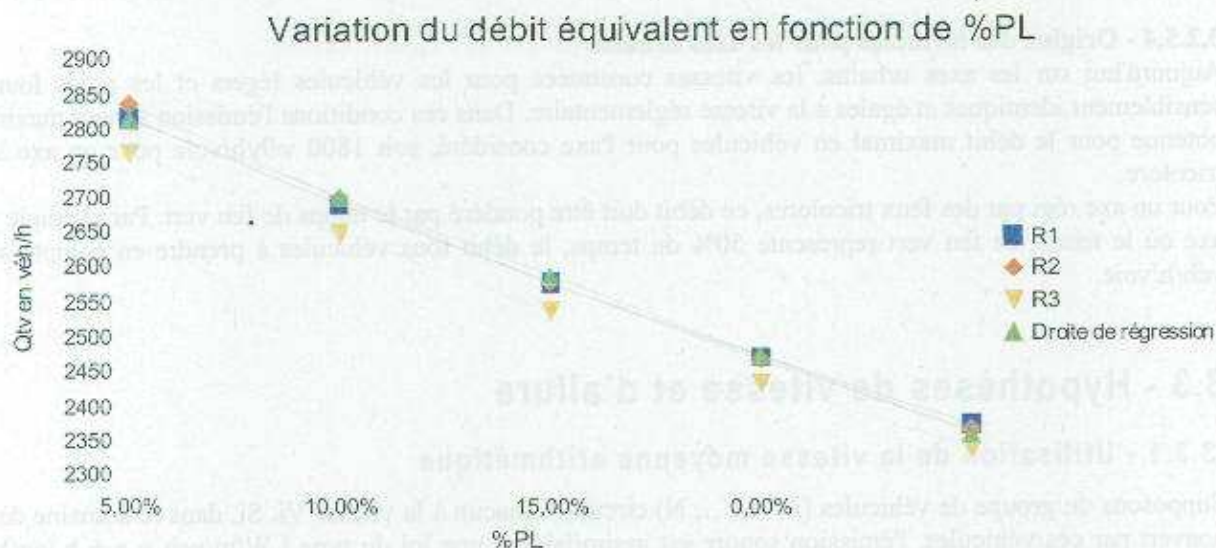


Figure 3.4 - Variation du débit équivalent Q_{TV} en fonction du %PL pour le site de Paris N104

La figure 3.5 suivante montre les droites de régression obtenues.

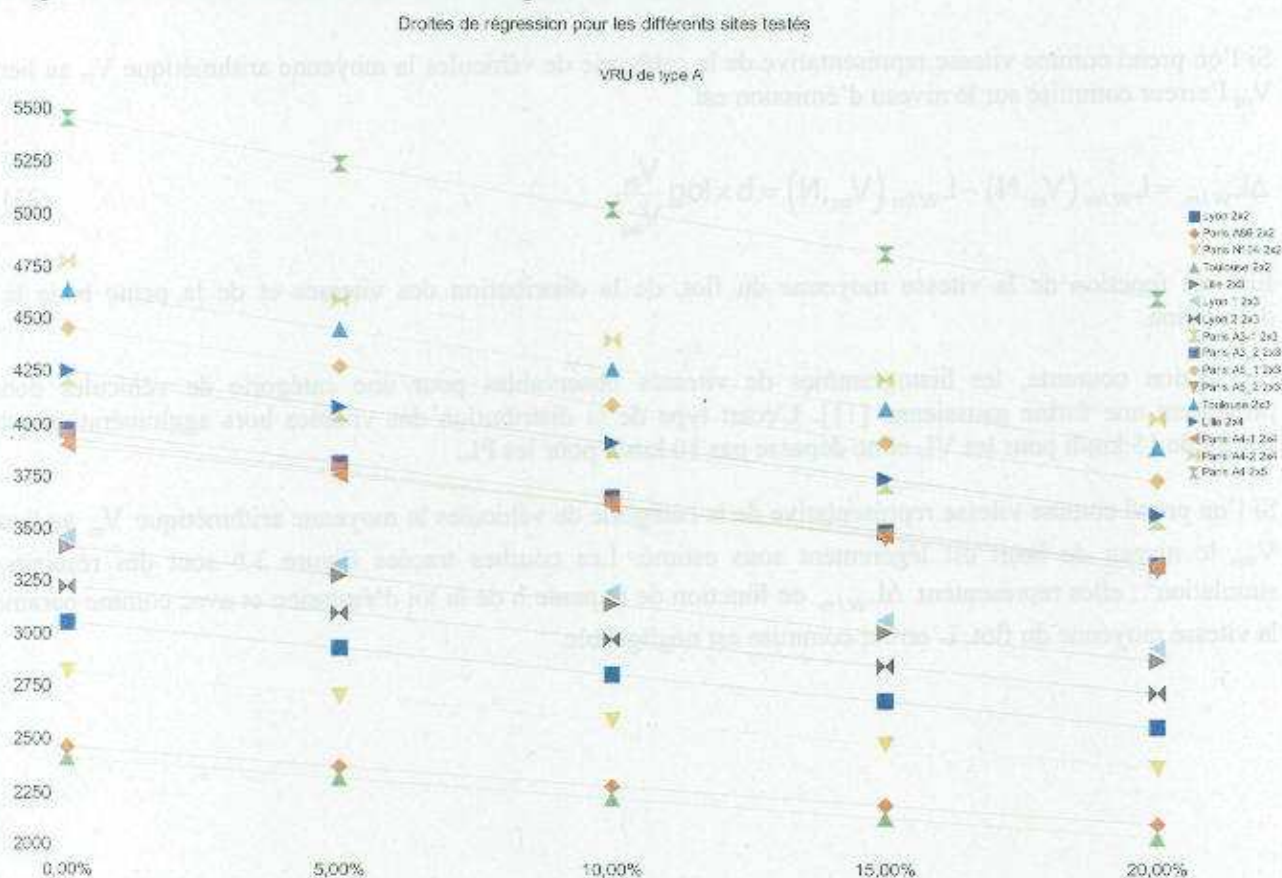


Figure 3.5 - Droites de régression Q_{TV} en fonction du %PL pour les différents sites testés

Des écarts importants sur les débits horaires sont observés, entre les classes de sites de même nombre de voies de circulation mais aussi entre les sites avec le même nombre de voies. Par contre les valeurs des puissances

d'émission sonore maximale correspondantes sont assez proches au sein d'une même classe et varient, de l'ordre de 1 dB(A) entre les classes. On choisit donc de retenir une formule par typologie de voie et on retient celle donnant les valeurs de débits maximales.

La formule pour les chaussées à 5 voies n'est pas donnée car on ne dispose que d'un site de cette typologie.

3.2.5.4 - Origine des formules pour les axes urbains

Aujourd'hui sur les axes urbains, les vitesses constatées pour les véhicules légers et les poids lourds sont sensiblement identiques et égales à la vitesse réglementaire. Dans ces conditions l'émission sonore maximum est obtenue pour le débit maximal en véhicules pour l'axe considéré, soit 1800 véh/h/voie pour un axe sans feu tricolore.

Pour un axe régi par des feux tricolores, ce débit doit être pondéré par le temps de feu vert. Par exemple pour un axe où le temps de feu vert représente 50% du temps, le débit tous véhicules à prendre en compte sera 900 véh/h/voie.

3.3 - Hypothèses de vitesse et d'allure

3.3.1 - Utilisation de la vitesse moyenne arithmétique

Supposons un groupe de véhicules ($i = 1, \dots, N$) circulant chacun à la vitesse V_i . Si, dans le domaine de vitesse couvert par ces véhicules, l'émission sonore est assimilable à une loi du type $L_{W/m/veh} = a + b \cdot \log(V/V_{ref})$, alors on peut montrer que l'émission sonore de ce groupe de véhicules est égale à celle qu'aurait un groupe de N véhicules circulant tous à la même vitesse "équivalente" V_{eq} , telle que :

$$(V_{eq})^{6/10} = \frac{1}{N} \sum_i (V_i)^{6/10} \quad (22)$$

Si l'on prend comme vitesse représentative de la catégorie de véhicules la moyenne arithmétique V_m au lieu de V_{eq} l'erreur commise sur le niveau d'émission est

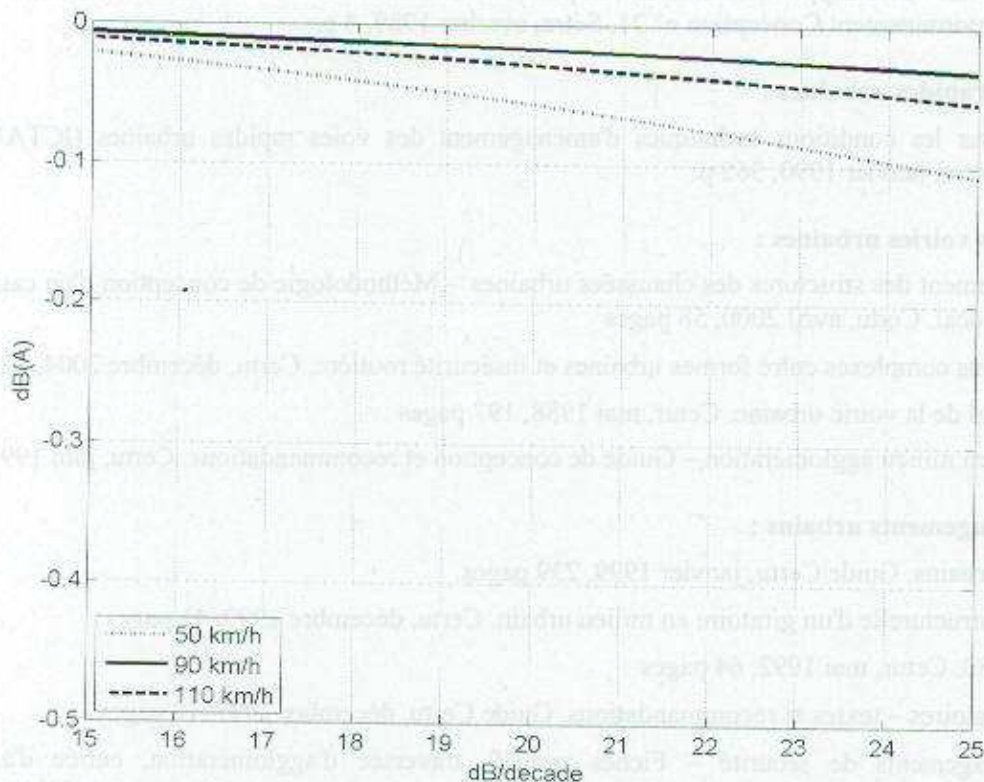
$$\Delta L_{W/m} = L_{W/m}(V_m, N) - L_{W/m}(V_{eq}, N) = b \times \log \frac{V_m}{V_{eq}} \quad (23)$$

Elle est fonction de la vitesse moyenne du flot, de la distribution des vitesses et de la pente b de la loi d'émission.

En section courante, les histogrammes de vitesses observables pour une catégorie de véhicules donnée présentent une forme gaussienne [11]. L'écart type de la distribution des vitesses hors agglomération est de l'ordre de 15 km/h pour les VL et ne dépasse pas 10 km/h pour les PL.

Si l'on prend comme vitesse représentative de la catégorie de véhicules la moyenne arithmétique V_m au lieu de V_{eq} , le niveau de bruit est légèrement sous estimé. Les courbes tracées Figure 3.6 sont des résultats de simulation² : elles représentent $\Delta L_{W/m}$ en fonction de la pente b de la loi d'émission et avec comme paramètre la vitesse moyenne du flot. L'erreur commise est négligeable.

² On considère un tirage aléatoire de 1000 valeurs de vitesses avec une distribution uniforme (qui provoque, à même écart type, une erreur plus importante qu'une distribution normale) sur une plage de vitesses de 20 km/h à 30 km/h selon les vitesses moyennes.



Il a été décidé dans la présente méthode d'adopter comme vitesse représentative de la catégorie de véhicules la vitesse moyenne arithmétique.

3.3.2 - Valeurs identiques sur chaque période

Selon les données publiées par l'observatoire national interministériel de sécurité routière [11], les vitesses moyennes pratiquées de nuit sont dans une fourchette de ± 5 km/h par rapport aux vitesses moyennes pratiquées de jour. Il n'a donc pas été jugé utile, dans la présente méthode, de définir des valeurs différentes selon la période de la journée.

3.3.3 - Vitesses forfaitaires en section courante

Les hypothèses de vitesses définies en section courante sont fondées sur les données publiées par l'observatoire national interministériel de sécurité routière [11]. Ces éléments montrent notamment que les vitesses moyennes pratiquées par les VL sont relativement proches des vitesses maximales réglementaires en situation "courante fluide" (non saturée).

3.3.4 - Hypothèses pour les zones particulières : références utiles

Pour les zones particulières sur routes et autoroutes interurbaines (rampes et descentes, virages, approche et sortie de carrefour, giratoires, bretelles, etc.), des hypothèses de vitesses utiles peuvent être trouvées dans les références suivantes, ou leur version actualisée :

- Comprendre les principaux paramètres de conception géométrique des routes. Fiche et note d'information, Sétra, janvier 2006, 28 p.
- ICTAAL - Instruction sur les conditions techniques d'aménagement des autoroutes de liaison -
- Circulaire du 12 décembre 2000. Guide technique, Sétra, décembre 2000, 58 p.
- Aménagement des carrefours interurbains sur les routes principales. Carrefours plans - Guide technique, Sétra, décembre 1998, 133 p.

- Aménagement des Routes Principales (ARP). Guide technique, Sétra, août 1994, 145 p.
- Implantation des voies supplémentaires en rampes sur infrastructures à 2 x 2 voies. Note d'Information Série Économie Environnement Conception n° 21, Sétra, octobre 1989, 4 p.

Pour les voies rapides urbaines :

- Instruction sur les conditions techniques d'aménagement des voies rapides urbaines (ICTAVRU). Guide technique, Cetur, janvier 1990, 365 p.

Pour les autres voiries urbaines :

- Dimensionnement des structures des chaussées urbaines – Méthodologie de conception d'un catalogue adapté au contexte local. Certu, avril 2000, 58 pages
- Etude des liens complexes entre formes urbaines et insécurité routière. Certu, décembre 2004, 120 pages
- Guide général de la voirie urbaine. Cetur, mai 1988, 197 pages
- Sections 70 en milieu agglomération – Guide de conception et recommandations. Certu, juin 1996, 47 pages

Pour les aménagements urbains :

- Carrefours urbains. Guide Certu, janvier 1999, 239 pages.
- Conception structurelle d'un giratoire en milieu urbain. Certu, décembre 1999, 41 pages
- Guide zone 30. Cetur, mai 1992, 64 pages
- Les mini-giratoires – textes et recommandations. Guide Certu, décembre 1997, 19 pages
- Petits aménagements de sécurité – Fiches zone30, traversée d'agglomération, entrée d'agglomération, aménagement de carrefour, traversée piéton, arrêt transport en commun et accès à un établissement scolaire. Certu 1994, 4 pages chaque fiche

La plupart de ces documents sont téléchargés sur le site Internet de la Documentation Technique Routière Française (<http://dtrf.setra.equipement.gouv.fr/>).

3.4 - Démarche générale de production des valeurs $L_{W/m}$ (1 véh/h)

3.4.1 - Enjeux

Les modèles de prévision du bruit routier en France donnent des estimations du bruit en bord de voie causé par un flot de véhicules. Ils sont basés sur un jeu de valeurs d'émission sonore unitaires, chaque valeur unitaire étant associée à une catégorie de véhicule. Les valeurs d'émissions sonores unitaires des véhicules sont fournies pour l'ensemble des conditions courantes d'utilisation. Ce ne sont pas les émissions sonores de tel ou tel modèle de véhicule dans une situation spécifique mais les émissions représentatives de chaque catégorie et permettant, pour un débit et une composition donnés, d'obtenir une estimation correcte du bruit en bord de route.

Les observations expérimentales montrent que le bruit de trafic augmente en général avec la vitesse du flot, mais que l'évolution n'est pas régulière sur toute la plage des vitesses. Ceci est dû au fait que le bruit d'un véhicule est produit par différentes sources dont les lois d'émission n'évoluent pas de même façon en fonction de la vitesse. Sur la version 1980 du Guide du Bruit [3] les émissions sonores $E(V)$ tracées en coordonnées semi-logarithmique (en V) sont des segments de droite et non une droite unique.

Comme indiqué sur la figure 3.7, on s'accorde à dire que bruit au passage d'un véhicule routier résulte principalement de deux sources : l'une liée au moteur, l'autre liée au roulement.

- la source liée au moteur dépend principalement du régime moteur. Elle est fonction du rapport de boîte utilisé, de l'allure (stabilisée, accélérée,...) et de la charge (route horizontale, déclivité...);
- la source bruit de roulement dépend de la vitesse et du revêtement de chaussée. Elle prédomine aux vitesses élevées³.

³Dans les années 70 le bruit lié au roulement était reconnu prédominer à partir de 70 km/h pour les VL, et 90 km/h pour les PL [12].

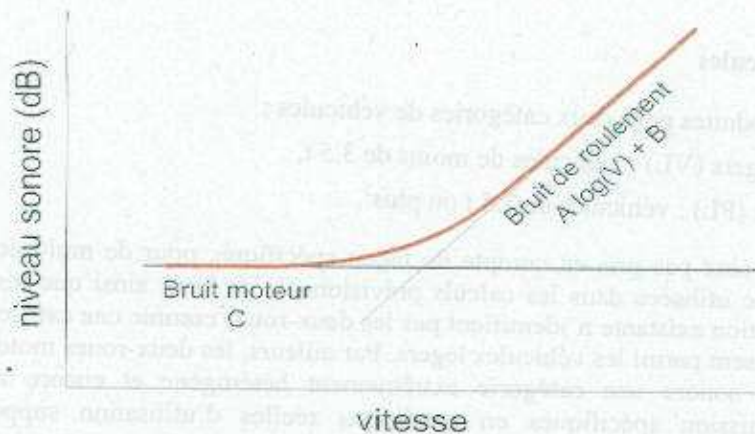


Figure 3.7 - Principe d'évolution du niveau de bruit L_{Amax} global en fonction de la vitesse, avec une contribution moteur indépendante de la vitesse.

Cette distinction bruit moteur/bruit de roulement a guidé ici la définition des situations à considérer et se traduit en termes d'allures, de déclivité et de catégorie de revêtement⁴. La décomposition a été largement utilisée dans la formulation des $L_{W,im}$, et s'avère justifiée au vu des comparaisons modèle/mesures.

Remarques :

La distinction moteur / roulement est explicitement prise en compte dans certains modèles : le modèle Américain par exemple [13] stipule un bruit moteur constant et un bruit de roulement évoluant avec la vitesse en $A \log(V) + B$.

L'émission globale d'un véhicule routier est aujourd'hui systématiquement formulée à l'INRETS en terme de "bruit moteur" et "bruit de roulement" [14,15].

3.4.2 - Démarche générale

L'ensemble de la démarche, sauf très rares exceptions, est fondé sur l'exploitation de résultats de mesures au passage de véhicules. Les mesures fournissent des niveaux sonores L_{Amax} à 7.5 m de l'axe de la voie, à une hauteur de 1.2 m au-dessus du sol.

Principe adopté

L'émission sonore L_{Amax} (niveau global en dB(A)) est décomposée en deux termes indépendants assimilés aux contributions sonores des deux sources :

$$L_{Amax} = L_{roulement} \oplus L_{moteur} \tag{24}$$

\oplus indique une addition énergétique : $L_1 \oplus L_2 = 10 \log(10^{L_1/10} + 10^{L_2/10})$.

$L_{roulement}$ est appelée "composante roulement", elle est supposée émise par le contact pneumatique-chaussée. Elle est fonction de la vitesse et de la nature du revêtement. Elle prédomine aux hautes vitesses

L_{moteur} est appelée "composante moteur" ou "composante mécanique", elle est supposée émise par l'ensemble des sources mécaniques du véhicule. Elle est fonction du régime moteur et de la charge. Ceci est traduit ici par une composante mécanique fonction de la vitesse, de la déclivité et de l'accélération. Elle prédomine aux basses vitesses

⁴ L'influence du revêtement n'est pas pris en compte dans la version 1980 du Guide du Bruit.

Catégories de véhicules

Les valeurs sont produites pour deux catégories de véhicules :

- les véhicules légers (VL) : véhicules de moins de 3.5 t,
- les poids lourds (PL) : véhicules de 3.5 t ou plus⁵.

Les deux-roues ne sont pas pris en compte de façon spécifique, pour de multiples raisons. Tout d'abord, les hypothèses de trafic utilisées dans les calculs prévisionnels de bruit ainsi que les comptages utilisables pour modéliser une situation existante n'identifient pas les deux-roues comme une catégorie particulière de véhicules, mais les comptabilisent parmi les véhicules légers. Par ailleurs, les deux-roues motorisés constituent du point de vue de l'émission sonore une catégorie extrêmement hétérogène et encore mal connue : la production d'hypothèses d'émission spécifiques en conditions réelles d'utilisation supposerait des études lourdes comprenant probablement une segmentation des véhicules en plusieurs catégories, démarche qui n'a pas été envisagée dans le cadre des travaux décrits dans cet ouvrage. Enfin, leur proportion dans le trafic total étant généralement faible sur les réseaux français, on estime que sauf exception la contribution sonore des deux-roues motorisés au L_{Aeq} global provoqué par le flot de circulation est modeste, et que leur assimilation à des véhicules légers n'induit pas d'erreur significative dans le calcul de cet indicateur. En tout état de cause, si la gêne induite spécifiquement par le bruit des deux-roues motorisés est indéniable, sa caractérisation requiert à l'évidence un indicateur acoustique plus pertinent que le niveau sonore équivalent L_{Aeq} .

Les valeurs d'émission pour la catégorie des véhicules PL sont fondées sur les résultats de mesures relatives à des poids lourds d'au moins 4 essieux (dits "trains routiers" ou TR).

Des tests de sensibilité ont montré que pour le trafic interurbain (autoroute ou route nationale) l'erreur commise sur le bruit de trafic (VL + PL) en assimilant l'ensemble des PL à des TR reste minime (inférieure au dB [16]).

Pour le trafic urbain une différenciation du trafic lourd en plusieurs classes aurait pu éventuellement se justifier [17]. Cependant une prise en compte spécifique des petits PL (2 ou 3 essieux) aurait nécessité un recueil de données très important qu'il n'a pas été jugé opportun d'engager. En conséquence il a été décidé d'assimiler l'ensemble des PL à des TR pour les calculs de bruit de trafic.

Les mesures

Les véhicules mesurés sont, autant que possible, des véhicules du trafic (principe du véhicule isolé de la méthode statistique au passage [18]) et les relevés sont effectués sur différents sites de façon à prendre en compte les différents revêtements, les conditions de circulation et le parc des véhicules. Lorsque ceci ne s'avère pas possible, i.e. lorsqu'on ne dispose pas de site approprié à la fois aux conditions de circulation à observer et aux exigences de mesures acoustiques (site "dégagé", véhicules du trafic suffisamment "isolés"), on utilise des véhicules d'essai et les mesures sont effectuées sur piste en conditions contrôlées.

La composante bruit de roulement dépend de la nature du revêtement. Elle a été déterminée à partir de mesures sous trafic, sur un échantillon suffisamment représentatif des revêtements.

La contribution bruit moteur est considérée ici ne pas dépendre de la nature du revêtement (l'absorption acoustique d'un revêtement poreux n'est pas suffisamment avérée sur le long terme pour prendre en compte son effet sur le bruit moteur). La contribution bruit moteur de la catégorie PL a été déterminée à partir de mesures sous trafic (montée, descente, accélération, décélération) ou de mesures en conditions contrôlées (route horizontale à vitesse stabilisée). Pour la catégorie VL, la contribution bruit moteur a été déterminée à partir de mesures en conditions contrôlées.

⁵Définition administrative en vigueur en France

Forme des résultats

Les résultats sont exprimés en niveau global. L'expression retenue pour la construction des formules est :

$$L_{Amax}(V, R, p, a) = L_{roulement}(V, R) \oplus L_{moteur}(V, p, a) \quad (25)$$

L_{Amax} niveau maximum⁶ au passage du véhicule⁷,

R catégorie du revêtement de chaussée,

p déclivité de la route,

a allure du véhicule (vitesse stabilisée, accélération, décélération).

Le véhicule est assimilé à une source compacte (ponctuelle) omnidirectionnelle.

La forme $L_{roulement} \oplus L_{moteur}$ résulte donc ici d'une construction : les contributions n'ont de validité que dans la mesure où leur combinaison restitue correctement les valeurs globales d'émission.

Transcription des L_{Amax} en $L_{W/m}$

Le $L_{W/m}$ est obtenu à partir du L_{Amax} en utilisant la relation :

$$L_{W/m} = L_{Amax} - 10 \log V - 30 + 10 \log [2\pi \times (7.5^2 + 1.2^2)] \quad (26)$$

Soit à 0.01 dB près :

$$L_{W/m} \approx L_{Amax} - 10 \log V - 4.4 \text{ dB} \quad (27)$$

où V est exprimé en km/h.

3.5 - Démarche de production des composantes roulement

Les composantes roulement sont issues de valeurs contenues dans la base de données "bruit de roulement" gérée par le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Strasbourg pour le compte du réseau des LPC, du SETRA et du CERTU. Celle-ci répertorie les données des mesures réalisées d'après la norme de mesure de bruit au passage S 31-119, proche de la norme ISO 11 819, selon les procédures Véhicules Isolés (véhicules du trafic) et Véhicules Maîtrisés (véhicules d'essais) [18], [19], [20].

Cette base est alimentée par tous les Laboratoires Régionaux des Ponts et Chaussées effectuant des mesures de bruit de roulement. Elle contient notamment des informations sur les niveaux sonores mesurés par catégorie de véhicule (VL et PL) et sur les revêtements.

Elle fournit pour chaque technique de revêtement des niveaux L_{Amax} mesurés sur différentes planches. Ces valeurs sont exprimées en dB(A) et correspondent à une température de 20°C.

3.5.1 - Origine des catégories de revêtements R1 R2 et R3

Au sein des techniques dont l'échantillonnage est significatif, on a constaté une forte dispersion des résultats de mesure. Produire des hypothèses d'émission sonore distinctes pour chacune des techniques routières usuelles aurait conduit à des écarts entre deux techniques voisines de l'ordre du décibel, écart

⁶Niveau global en dB(A).

⁷Sauf indication contraire, on entendra désormais par "véhicule" le véhicule représentatif de la catégorie considérée. On utilisera aussi VL ou PL pour désigner le VL représentatif ou le PL représentatif.

bien plus faible que la dispersion interne à chaque technique. Les techniques de revêtements routiers usuelles ont donc été regroupées en trois catégories notées R1 à R3 (voir 0 pour les pavés, exclus de cette classification).

La classification des techniques n'a pas été définie a priori mais a résulté d'une analyse statistique de la base de données.

La base utilisée pour classer les revêtements est issue des mesures VL réalisées selon la procédure VI (Véhicules Isolés). Une centaine de planches, dont la vitesse de référence est 90km/h, a été utilisée.

Remarque : une étude similaire sur la partie VM (Véhicules maîtrisés) de la base a conduit à la même classification. De même, la cohérence avec les mesures VI/VL à 120km/h et les mesures VI/PL a été vérifiée.

3.5.2 - Émission globale selon la catégorie de revêtement

3.5.2.1 - Démarche

Une formule d'émission représentative a été produite pour chaque catégorie de véhicules et chaque catégorie de revêtement. Afin d'accorder un poids identique à chaque technique routière quel que soit le nombre de sites mesurés, la démarche a été scindée en deux étapes : la première étape consiste en une étude par technique (chaque planche étant échantillonnée par pas de 10km/h, une moyenne arithmétique est calculée par tranche de vitesse de 10km/h), puis la deuxième consiste à agréger les résultats de l'ensemble des techniques d'une même catégorie (en utilisant les valeurs par tranches de 10 km/h de chaque technique).

Les valeurs d'émission ont été calculées à partir de la base VI enrichie des valeurs VM (une étude a déjà montré leur équivalence), ce qui représente environ 450 planches VL et une centaine de planches PL (4 essieux ou plus).

Dans le cas des PL, les techniques insuffisamment renseignées n'ont pas été intégrées dans les calculs, mais la cohérence des résultats a été vérifiée.

Les campagnes de mesure spécifiques réalisées en montée et en descente ont permis de vérifier que ces valeurs convenaient à ces situations (mesures de VL sur palier, descente et rampe, pour des vitesses comprises entre 70 et 130km/h).

3.5.2.2 - Validité en vitesse

Les formules ainsi obtenues (donnant le L_{Amax} en fonction du logarithme de la vitesse) couvrent les vitesses comprises entre 70 et 130 km/h pour les VL, et entre 70 et 90 km/h pour les PL.

3.5.2.3 - Dispersion des sites autour des valeurs moyennes

La dispersion des L_{Amax} de chaque site autour de ces valeurs moyennes a également été étudiée. Au sein de chaque catégorie de revêtements, l'étendue entre les sites est de 5 à 6 dB(A). Leur dispersion par rapport à la valeur moyenne de la catégorie présente une allure gaussienne, avec un écart type de l'ordre de 1 à 1,5 dB(A) selon le type de véhicules, la vitesse et la catégorie de revêtement considéré.

3.5.3 - Détermination de Lroulement pour les catégories de revêtements R1 à R3

3.5.3.1 - Démarche

Connaissant :

- d'une part l'émission globale L_{Amax} déterminée précédemment pour les trois catégories de revêtements R1 à R3 sur les domaines de vitesse 70-130 km/h pour les VL et 70-90 km/h pour les PL,
- d'autre part la valeur de L_{moteur} pour les VL et les PL en stabilisé, sur route horizontale (voir plus loin), la valeur de Lroulement (en fonction de la vitesse) pour les trois catégories de revêtements R1 à R3 a été déduite par "soustraction énergétique" de ces deux niveaux, puis ajustement par une formule linéaire en $\log(Vitesse)$. Pour les PL, la pente a été fixée forfaitairement à 20 quel que soit la catégorie de revêtement, afin d'éviter des problèmes de cohérence apparus par la suite. Après avoir vérifié que l'enjeu sur le bruit global était faible, la

valeur de 20 a été retenue, d'une part parce qu'elle est en cohérence avec la pente relative aux VL, et d'autre part parce que c'est à peu près la valeur trouvée pour la contribution de la zone remorque par mesure avec antenne sur des PL du trafic.

3.5.3.2 - Validité en vitesse des résultats

Les formules ainsi obtenues ont été extrapolées sur l'ensemble du domaine de vitesse visé par la méthode : 5 - 130 km/h pour les VL et 5 - 100 km/h pour les PL. Aux faibles vitesses, leur représentativité vis à vis du bruit de roulement n'est pas avérée, mais les valeurs correspondantes étant faibles vis à vis de la composante moteur, ceci ne remet pas en cause la représentativité du bruit global obtenu par sommation.

3.5.4 - Effet du vieillissement

La base de données d'où sont issues les mesures repose en majorité sur des planches de moins de trois ans. Les valeurs d'émission sonore calculées à partir de cette base sont donc caractéristiques de revêtements plutôt jeunes, elles ont été considérées comme représentatives de l'âge moyen des planches, soit 2 ans.

Pour évaluer l'effet du vieillissement de 2 à 10 ans pour les VL, les $L_{Amax}(VL, 90 \text{ km/h})$ de chaque planches de la base de données ont été représentés en fonction de leur âge pour chacune des catégories de revêtement, avec :

- la régression sur ce nuage de points,
- une première hypothèse considérant le L_{Amax} stable avec l'âge et égal à la composante roulement de la catégorie,
- une deuxième hypothèse considérant que le L_{Amax} augmente de 1dB(A) tous les deux ans, la composante roulement de la catégorie correspondant à l'âge de 2 ans.

L'écart type entre le nuage de point et chacune de ces droites a été calculé.

L'écart-type associé à la régression est la valeur la plus faible que l'on puisse obtenir si le nuage de points est approximé par une droite. La comparaison entre celui-ci et l'écart-type associé à chaque hypothèse permet d'apprécier la pertinence de l'hypothèse.

Cette démarche a été appliquée à la fois pour l'ensemble des planches, et pour les seules planches âgées d'au moins 3 ans, ceci afin de vérifier que les conclusions ne sont pas trop influencées par les planches jeunes, qui constituent la majorité de l'échantillon.

Pour les TR, l'augmentation a été fixée à 0,6 fois l'augmentation associée aux VL, par cohérence avec les relations entre L_{Amax} VL et TR obtenues par ailleurs (voir 3.5.7.3).

3.5.5 - Exemple de revêtements pavé

La classification des revêtements effectuée ne comprend pas les pavés. Etant donné la diversité des caractéristiques possibles pour ce type de revêtement et le faible nombre de mesures disponibles, il n'est pas envisageable de fournir des valeurs d'émission moyennes. Cependant, sont données ici, à titre d'information, des valeurs de Roulement VL obtenues sur la base de deux sites comportant un même type de pavés (carrés de 140/160mm jointoyés au mortier de ciment et d'épaisseur supérieure à 6cm). Environ 80 à 100 véhicules ont été mesurés par site, avec des vitesses s'étendant de 35 à 60 km/h (zone urbaine).

Les résultats de mesure obtenus sur les deux sites considérés étant proches, une régression linéaire sur l'ensemble des mesures des deux sites réunis a été calculée. La composante roulement est ensuite obtenue en soustrayant la composante moteur VL définie pour une allure stabilisée sur route horizontale (voir le chapitre 3.6 « Démarche de production des composantes moteur VL »), puis en effectuant une régression linéaire.

Le résultat obtenu pour ce type de pavé est : $L_{r_{w/m}} \text{ pavés VL} = 61,2 + 23,7 \log(V/90)$ (28)

Cette formule est valide jusqu'à 60km/h.

En revanche, aucune mesure n'est disponible pour les PL. Etant donné que l'on observe une augmentation de 4dB de la composante roulement pour les VL avec ce type de pavé par rapport au revêtement R3, et considérant

que le pneu de PL est a priori moins sensible à l'état de la surface, on peut majorer l'abaque R3 des PL de 4 dB(A), sachant que cette valeur est probablement surestimée.

Il faut toutefois noter qu'en plus du bruit de roulement, il peut y avoir d'autres sources de bruit pour les PL, tels que des bruits de caisse...

3.5.6 - Coefficient de sécurité

Pour ce qui concerne spécifiquement la variabilité des caractéristiques acoustiques des revêtements de chaussée, la composante roulement peut être majorée d'un coefficient de sécurité adapté à la probabilité de dépassement que le maître d'ouvrage juge admissible. Le tableau 3.8 présente, dans le cas d'une distribution gaussienne, la majoration à appliquer aux valeurs moyennes données dans le chapitre 2.7.2.2 en fonction de la probabilité de dépassement admise.

Probabilité de dépassement admise	Majoration	Exemple pour $dIC95\% = 3$ dB(A)
40 %	0,13 dIC95%	0,4 dB(A)
30 %	0,27 dIC95%	0,8 dB(A)
20 %	0,43 dIC95%	1,3 dB(A)
10 %	0,65 dIC95%	2,0 dB(A)
5 %	0,84 dIC95%	2,5 dB(A)

Tableau 3.8 - Majoration à appliquer à la valeur moyenne en fonction de la probabilité de dépassement admise (dIC95% est la demi-largeur de l'intervalle de confiance à 95 %)

3.5.7 - Possibilité d'utiliser d'autres valeurs de la composante roulement

3.5.7.1 - Conditions

Les formules de la composante "roulement" exposées précédemment correspondent pour chaque catégorie de revêtements à la moyenne d'un grand nombre de planches. La dispersion des valeurs réelles de chaque planche au sein de chaque catégorie de revêtements n'est pas négligeable (voir sous-chapitre 3.5.1). L'écart entre la planche du site à modéliser et l'hypothèse correspondant à la catégorie du revêtement peut de ce fait induire une erreur significative sur les niveaux sonores calculés aux récepteurs.

C'est pourquoi il est admis, sous certaines conditions, d'utiliser pour la composante "roulement" une valeur autre que celles données dans les formules précédentes. Ces conditions sont les suivantes :

- la modélisation doit porter sur une situation existante : la planche existe et aucune projection dans le temps n'est effectuée (ceci correspond typiquement à l'évaluation d'un état initial) ;
- des résultats de mesures de bruit des véhicules au passage, réalisées sur la même planche selon les normes en vigueur, sont disponibles pour les VL et les PL (ou à défaut, pour les VL seuls). Les "trains routiers" (poids lourds d'au moins 4 essieux) définis par la norme S 31-119 seront considérés ici représentatifs de l'ensemble des poids lourds ;
- la modélisation est représentative de la date à laquelle les mesures au passage ont été réalisées.

Ces valeurs seront produites sous la seule responsabilité de l'opérateur et devront être justifiées dans le rapport d'étude, notamment par une référence au procès-verbal d'essai des mesures exploitées.

3.5.7.2 - Démarche

Pour chaque catégorie de véhicules, le procès-verbal d'essai des mesures au passage fournit la relation entre le L_{Amax} à 7,50 m (pour la température de référence de 20 °C) et la vitesse, sur une plage de vitesse centrée sur la vitesse moyenne V_{moy} des passages de véhicules exploités. La démarche consiste à calculer la composante roulement correspondante à la vitesse V_{moy} . La formule générale de la composante roulement est ensuite produite en appliquant à cette valeur une variation forfaitaire en $\log(V)$. Le détail de ces étapes est le suivant :

- 1) La valeur L_{Amax} pour cette vitesse moyenne V_{moy} est extraite du PV de mesures ou recalculée à partir de la relation fournie dans le PV.

2) Le niveau de puissance d'émission sonore par mètre de ligne source pour un débit unitaire $L_{w/m}(V_{moy})$ est calculé par :

$$L_{w/m}(V_{moy}) = L_{Amax}(V_{moy}) - 10 \cdot \log(V_{moy}) - 4,4 \quad (29)$$

où V_{moy} est en km/h.

Ce niveau doit être supérieur d'au moins 5 dB(A) à la composante moteur $L_{m_w/m}(V_{moy})$ de la catégorie de véhicules à la vitesse V_{moy} , définie au chapitre 2.7. Cette condition permet de limiter l'erreur commise à l'étape suivante sur l'estimation de la composante roulement par soustraction.

Si cette condition n'est pas vérifiée, la démarche ne peut être poursuivie et la modélisation doit se fonder sur les formules publiées dans le présent ouvrage.

3) La composante roulement à V_{moy} est déduite par :

$$L_{r_w/m}(V_{moy}) = 10 \cdot \log[10^{L_{w/m}(V_{moy})/10} - 10^{L_{m_w/m}(V_{moy})/10}] \quad (30)$$

où

$L_{m_w/m}(V_{moy})$ est la composante moteur de la catégorie de véhicules à la vitesse V_{moy} en conditions d'allure stabilisée sur route horizontale.

4) La formule générale de la composante roulement pour le site étudié est alors obtenue par :

$$L_{r_w/m}(V) = a + b \cdot \log(V/V_{ref}) \quad (31)$$

$$\text{Avec } a = L_{r_w/m}(V_{moy}) - 20 \log(V_{moy}/V_{ref}) \text{ et } b = 20 \quad (32)$$

3.5.7.3 - Démarche alternative si les mesures sont indisponibles pour les PL

Si les mesures au passage ne sont disponibles que pour les VL (ou si le nombre de PL mesurés est inférieur au minimum requis par la norme), la composante roulement pour les PL peut être estimée à partir de la composante roulement des VL selon la démarche suivante.

1) La composante roulement des VL est déterminée conformément à la démarche décrite plus haut.

2) Le niveau de puissance $L_{w/m}$ pour les PL à la vitesse de référence de 80 km/h est estimé à partir du niveau $L_{w/m}$ pour les VL à 90 km/h par :

$$L_{w/m}(PL, 80 \text{ km/h}) = 0,6 L_{w/m}(VL, 90 \text{ km/h}) + 29,1 \quad (33)$$

Cette formule résulte d'une analyse statistique sur plus de 200 planches⁸ [réf. : Exploitation de la base de données « Bruit de roulement » : Relation niveau LAmax TR / niveau LAmax VL, S. Doisy (LRPC Strasbourg), mai 2005].

Ce niveau doit être supérieur d'au moins 5 dB(A) à la composante moteur $L_{m_w/m}(80 \text{ km/h})$ des PL à la vitesse de 80 km/h, définie au chapitre 2.7. Cette condition permet de limiter l'erreur commise à l'étape suivante sur l'estimation de la composante roulement par soustraction.

3) La composante roulement des PL à 80 km/h est déduite par :

$$L_{r_w/m}(PL, 80 \text{ km/h}) = 10 \cdot \log[10^{L_{w/m}(PL, 80 \text{ km/h})/10} - 10^{L_{m_w/m}(PL, 80 \text{ km/h})/10}] \quad (34)$$

où

$L_{m_w/m}(PL, 80 \text{ km/h})$ est la composante moteur des PL à 80 km/h en conditions d'allure stabilisée sur route horizontale.

4) La formule générale de la composante roulement pour le site étudié est alors obtenue par :

$$L_{r_w/m}(PL, V) = a + b \cdot \log(V/80) \quad (35)$$

$$\text{Où } a = L_{r_w/m}(PL, 80 \text{ km/h}) \text{ et } b = 20 \quad (36)$$

3.5.7.4 - Vérification de la pertinence de l'utilisation d'autres valeurs de la composante roulement

Une étude a été réalisée, sur un échantillon d'environ 200 sites, afin de comparer le bruit de trafic obtenu :

- a) en sommant les composantes moteur et roulement définies dans les abaques d'émission

⁸ L'analyse a été faite en L_{Amax} et est transcrite ici en $L_{w/m}$.

- b) à partir des $L_{Amax}(VL, 90 \text{ km/h})$ et $L_{Amax}(PL, 80 \text{ km/h})$ réels du site mesurés au passage,
- c) à partir du $L_{Amax}(VL, 90 \text{ km/h})$ réel du site, et du $L_{Amax}(PL, 80 \text{ km/h})$ estimé à partir de la valeur VL selon la démarche utilisée au chapitre précédent.

Sur chaque site, la puissance d'émission sonore par mètre de ligne source pour un débit unitaire (c'est à dire 1 véhicule par heure) $L_{w,m}$, a été calculée, pour différentes hypothèses de pourcentage PL (de 0 à 50%), selon chacune des trois approches.

Les résultats confirment que, quelque soit la catégorie de revêtement, les abaques peuvent s'écarter assez fortement des mesures (écart type de 1 à 2,5dB(A)), et qu'il est donc préférable d'utiliser des valeurs mesurées au passage si les conditions énoncées plus haut sont réunies.

Concernant l'évaluation des niveaux PL à partir des niveaux VL, on remarque que les écarts de puissance d'émission sonore par rapport à la valeur réelle sont faibles (la plupart sont inférieurs à 1dB), surtout pour des pourcentages de PL peu élevés (rappelons qu'une telle approximation se ferait, dans la plupart des cas, lorsque peu de PL circulent sur la voie puisqu'il est alors difficile de les mesurer). Lorsqu'elle est possible, l'utilisation d'une telle estimation paraît donc judicieuse, et préférable aux abaques.

3.6 - Démarche de production des composantes moteur VL

La composante moteur VL proposée, notée L_{moteur} , est supposée émise par l'ensemble des sources mécaniques d'un véhicule "moyen" représentatif des VL du trafic. Elle est fonction du régime et du couple moteur. Ceci est traduit ici par un L_{moteur} fonction de la vitesse, de la déclivité et de l'accélération.

Les évaluations ont été d'abord effectuées en L_{Amax} au passage. Elles ont été ensuite traduites en $L_{w,av,VL}$. Les formules sont exprimées ici en L_{Amax} . Elles sont données sous forme de segments de droites du type $a + b \log(V)$. Elles ont été "ajustées" à la marge pour assurer leur cohérence.

3.6.1 - Route horizontale

L'évaluation de la composante moteur des véhicules légers est basée sur des mesures effectuées sur piste en conditions contrôlées. L'utilisation de relevés "sous trafic" est pratiquement impossible : ils doivent être effectués à des vitesses très basses pour que le bruit moteur contribue significativement au bruit total et cette condition est trouvée plutôt en milieu urbain où les sites sont le plus souvent insuffisamment "dégagés" pour permettre d'effectuer des mesures acoustiques.

Les mesures n'étant pas effectuées sous trafic, l'évaluation de la composante moteur nécessite que soit déterminé un comportement de conduite représentatif (l'utilisation du rapport de boîte en fonction de la vitesse).

Toutes les mesures de bruit VL sur piste ont été effectuées sur un même site [21, 22, 23]. Elles seront désignées par la suite sous le terme "BdD piste".

3.6.1.1 - Route horizontale, vitesse stabilisée

L'évaluation est basée sur deux ensembles de données expérimentales⁹ :

- les niveaux de bruit au passage de la BdD piste,
- les informations d'une étude expérimentale sur les utilisations réelles des véhicules (BdD EUREV [24]).

⁹Elle est détaillée §4 à titre d'exemple.

Niveaux de bruit au passage

Les mesures de bruit au passage concernent 14 véhicules couvrant les différentes motorisations (diesel, essence) et une large gamme de cylindrée [21, 22]. Pour chaque rapport de boîte de l'ordre de 10 passages ont été effectués, répartis sur la gamme de vitesses couverte par le rapport engagé¹⁰. Toutes les mesures ont été effectuées sur une même piste d'essai. Pour chaque véhicule, les lois bruit moteur (fonction du régime) et bruit de roulement (fonction de la vitesse) ont été évaluées. Plusieurs méthodes ont été éprouvées pour évaluer le bruit moteur : mesure directe avec le véhicule à l'arrêt [14], mesure "directe" en condition réelle en utilisant des passages à des conditions vitesse/régime pour lesquelles le bruit moteur prédomine [14], méthode d'identification utilisant des conditions de passage où bruit moteur et bruit de roulement co-existent [25].

Comportement de conduite

La base de données Eurev [24] contient des enregistrements (vitesse, régime, rapport de boîte...) effectués sur véhicules conduits par leurs propriétaires sur une période de quelques semaines (usage réel). Les parcours, le type d'axe parcouru, ne sont pas repérés.

Les enregistrements permettent de déterminer le pourcentage d'utilisation du rapport de boîte en fonction de la vitesse lors d'une circulation à allure stabilisée¹¹.

Evaluation de la composante moteur VL à vitesse stabilisée

Le niveau sonore de la composante moteur est déterminé en fonction de la vitesse en prenant en compte le pourcentage d'utilisation du rapport de boîte :

- pour chaque véhicule et à chaque vitesse on évalue le bruit moteur représentatif de la conduite sous trafic, en combinant (moyenne énergétique) les niveaux sonores aux différents rapports de boîte au prorata de leur utilisation à la vitesse considérée¹² ;
- pour chaque vitesse on calcule ensuite la composante moteur du VL représentatif¹³ en effectuant la moyenne énergétique (moyenne sur les véhicules) des bruits moteur de chaque véhicule.

Formulation retenue

La formulation retenue après harmonisation avec les autres formules est donnée dans le Tableau 3.9

V [km/h]	20 à 30	30 à 110	110 à 130
L_{moteur} [dB(A)]	60.6	$66.3 + 12.0 \log(V/90)$	$64.6 + 31.3 \log(V/90)$

Tableau 3.9- Composante moteur VL, vitesse stabilisée, route horizontale.

Les valeurs correspondent aux expressions en L_{Amax} .

3.6.1.2 - Route horizontale, accélération

L'évaluation est basée

- sur des niveaux de bruit au passage de la base de données BdD piste,
- sur une hypothèse de comportement de conduite.

Niveaux de bruit au passage

Les mesures de bruit au passage concernent 10 véhicules. Pour chaque rapport de boîte 10 passages ont été effectués, répartis sur toute la gamme de vitesse couverte par le rapport (i.e. jusqu'aux très hauts régimes). La consigne au conducteur était d'accélérer de façon à adopter un comportement de conduite "réel" ; pour deux passages la consigne était "pied au plancher" en évitant toutefois le patinage. L'accélération était mesurée à

¹⁰ Sans dépasser 110 km/h.

¹¹ On retient comme plages d'allure stabilisée celles durant lesquelles la vitesse reste constante pendant au moins 4 secondes

¹² Les niveaux sont ceux donnés par la loi composante moteur en fonction du régime.

¹³ VL moyen du trafic

chaque passage. Seuls les trois premiers rapports de boîte ont été utilisés¹⁴. Le bruit moteur est évalué en fonction de la vitesse pour des classes d'accélération de 0.5 m/s^2 d'étendue¹⁵.

Comportement de conduite

L'hypothèse retenue pour le comportement de conduite est qu'à la vitesse V considérée le conducteur sélectionne le rapport de boîte optimal¹⁶ et l'accélération maximale mesurée sur piste sous ce rapport de boîte.

Evaluation de la composante moteur VL sous accélération

Pour chaque véhicule on obtient ainsi une composante moteur sous accélération (si le véhicule n'a pas été mesuré dans ces conditions, sa composante moteur est évaluée par extrapolation). La composante moteur d'un VL du trafic est la moyenne énergétique des composantes moteur des dix véhicules.

Formulation retenue

La formulation retenue après harmonisation avec les autres formules est donnée dans le Tableau 3.10

V [km/h]	10 à 20	20 à 100	100 à 130
L_{moteur} [dB(A)]	$85,7 + 24,1 \log(V/90)$	70	$68,2 + 38,6 \log(V/90)$

Tableau 3.10 Composante moteur VL, accélération, route horizontale. Les valeurs correspondent aux expressions en $L_{A_{\text{max}}}$.

3.6.1.3 - Route horizontale, décélération

L'évaluation est basée

- sur des niveaux de bruit au passage de la BdD piste,
- sur deux hypothèses de comportement de conduite.

Niveaux de bruit au passage

Les mesures effectuées sur 3 véhicules en condition de décélération ont montré que dans une configuration vitesse/rapport de boîte donnée le bruit émis est identique au bruit émis à vitesse stabilisée [23]. Il a donc été décidé d'utiliser comme base expérimentale du bruit en décélération celle du bruit en vitesse stabilisée¹⁷.

Comportement de conduite

Deux comportements de conduite sont pris en compte : celui d'une décélération au frein moteur, celui d'une décélération au frein à pied.

- En décélération au **frein moteur** le rapport de boîte utilisé à la vitesse considérée est le rapport optimal du véhicule. L'utilisation du premier rapport de boîte est cependant exclue : on reste sur le rapport 2 aux vitesses faibles sauf si la vitesse devient inférieure à la vitesse de passage la plus faible mesurée en rapport de boîte 2 avec ce véhicule, auquel cas on passe au point mort et le bruit moteur est alors celui du ralenti.
- En décélération au **frein à pied** on considère une démarche similaire à celle de l'allure stabilisée 1.1.0.3 en excluant cependant ici aussi l'utilisation du rapport 1 : si à la vitesse considérée l'histogramme du comportement de conduite conduit à adopter le rapport 1, on reste sur le rapport 2, sauf si la vitesse devient inférieure à la vitesse de passage la plus faible mesurée en rapport de boîte 2 avec ce véhicule, auquel cas on passe au point mort et le bruit moteur est alors celui du ralenti.

¹⁴Pour les derniers rapports de boîte le bruit de roulement devient prédominant par rapport au bruit moteur (vitesses élevées) et l'accélération disponible est faible.

¹⁵ $\gamma \in [0,5 \text{ m/s}^2]$, $\gamma \in [0,5 \text{ m/s}^2 < \gamma < 1,0 \text{ m/s}^2]$...

¹⁶Le rapport de boîte optimal est défini ici comme étant le rapport de boîte qui, à la vitesse considérée, procure le régime moteur le plus proche de celui correspondant au couple maximum. Le régime moteur correspondant n'est pas le régime moteur maximum.

¹⁷Rappel : si le bruit moteur en décélération est, à même configuration vitesse/rapport de boîte, égal au bruit moteur à vitesse stabilisée, il n'en résulte pas nécessairement qu'à même vitesse de trafic le bruit en décélération soit le même qu'à vitesse stabilisée : le comportement de conduite peut en effet être différent.

Pour chacun des comportements on évalue les composantes moteur individuelles (composante moteur, en décélération, de chacun des 14 véhicules) et on adopte pour le véhicule moyen représentatif du flot, la moyenne énergétique des composantes moteur individuelles.

L'utilisation du rapport de boîte optimal pour le comportement frein moteur tend à considérer des régimes plutôt élevés et donc à donner un niveau de composante moteur plus important que le comportement frein à pied. La différence s'avère in fine négligeable pour les vitesses inférieures à 10 km/h, importante vers 15 km/h et faible à partir de 40 km/h.

Evaluation de la composante moteur VL sous décélération

Vu l'absence de connaissance des comportements réels il a été décidé de retenir pour la composante moteur:

- En deçà de 80 km/h, la moyenne énergétique des composantes obtenues avec les deux hypothèses
- Au delà de 80 km/h, la composante obtenue avec l'hypothèse "frein à pied" (i.e. la même composante qu'en vitesse stabilisée).

Formulation retenue

La formulation retenue après harmonisation avec les autres formules est donnée dans le Tableau 3.11

V [km/h]	10 à 25	25 à 80	80 à 110	110 à 130
L_{moteur} [dB(A)]	$73.3 + 18.7 \times L_v$	$66 + 5.5 \times L_v$	$66.3 + 12 \times L_v$	$64.6 + 31.3 \times L_v$

Tableau 3.11 Composante moteur VL, décélération, route horizontale.

Les valeurs correspondent aux expressions en L_{Amax} . Convention : $L_v = \log(V/90)$.

3.6.1.4 - Route horizontale. Comparaison des $L_{moteur,VL}$ aux différentes allures

Les composantes moteurs correspondant aux différentes allures sont tracées Figure 3.12. La condition de vitesse stabilisée est considérée ne se produire qu'à partir de 20 km/h. En deçà les véhicules sont en accélération ou en décélération.

- **Accélération.** C'est la condition la plus bruyante à toutes les vitesses. L'augmentation du niveau entre 10 km/h et 20 km/h correspond à une circulation en rapport de boîte 1. La plage de niveau constant correspond aux changements de rapports de boîte. L'augmentation à partir de 100 km/h correspond à une circulation sous le cinquième (dernier) rapport de boîte.
- **Décélération.** Compte-tenu des 2 comportements de conduite (frein moteur, frein à pied) retenus en deçà de 80 km/h, la composante moteur sous décélération est, supérieure à celle obtenue en vitesse stabilisée.
- **Vitesse stabilisée.** C'est la condition la moins bruyante. On retrouve, aux hautes vitesses, l'augmentation du bruit correspondant à une circulation sous le cinquième (dernier) rapport de boîte.

3.6.2 - Montée

Il a été décidé d'adopter pour les VL en rampe une contribution moteur identique à celle sur route horizontale à même allure.

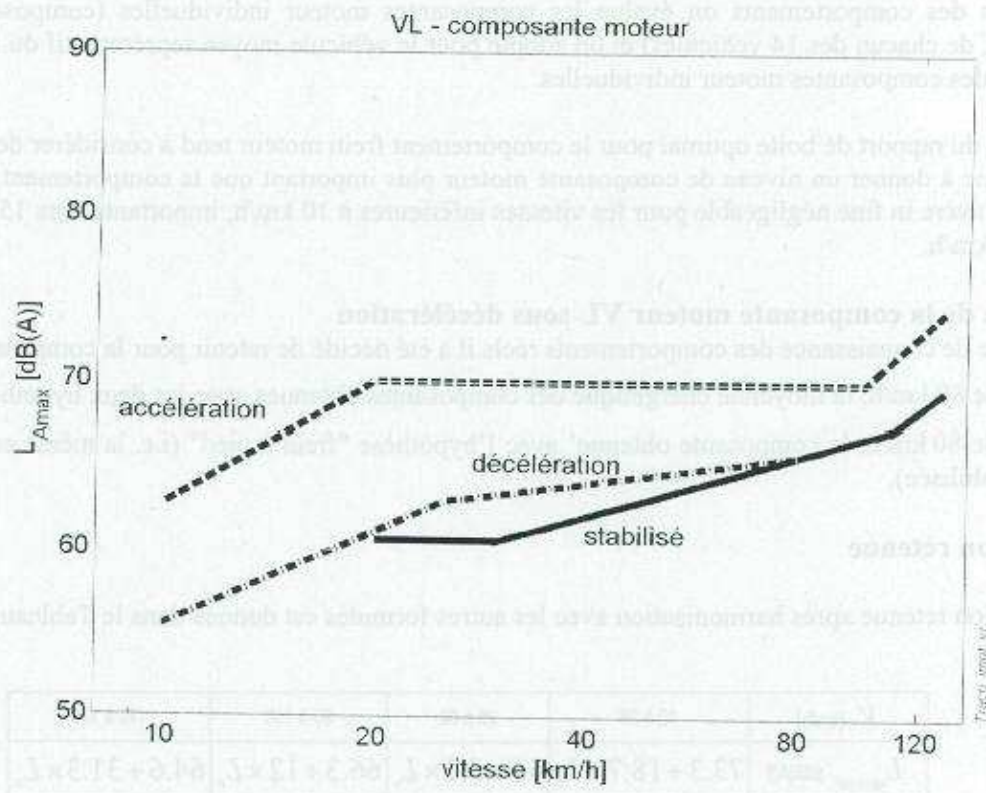


Figure 3.12 VL - Route horizontale - Composante bruit moteur.

3.6.2.1 - Montée, vitesse stabilisée

L'effet d'une rampe en montée sur un véhicule circulant à vitesse stabilisée est d'augmenter la résistance à l'avancement du véhicule, donc le couple moteur nécessaire pour maintenir la vitesse et, par voie de conséquence, d'augmenter le bruit rayonné par le moteur [26]. Aux hautes vitesses où le bruit moteur est masqué par le bruit de roulement, l'effet attendu sur le bruit global est faible. Des campagnes expérimentales ont été effectuées sur pistes d'essai, en conditions contrôlées [27], [28], [29] et sous trafic réel [30]. La difficulté de la démarche expérimentale est de pouvoir comparer des niveaux au passage observés en montée à ceux observés sur route horizontale, toutes choses étant égales par ailleurs, et en particulier le bruit de roulement. Les composantes roulement et moteur sont, de plus, déterminées avec une certaine marge d'incertitude. L'analyse des résultats n'a pas permis de conclure sur un effet ou une absence d'effet de la montée sur le bruit moteur. En toute hypothèse, l'effet résultant sur le bruit global est très faible.

3.6.2.2 - Montée, accélération

L'accélération et la montée ont chacune pour effet d'augmenter la charge moteur. Ne connaissant pas l'effet cumulé, il a été convenu d'adopter une contribution moteur identique à celle sur route horizontale à même allure.

3.6.2.3 - Montée, décélération

La montée favorise la décélération et devrait donc, par rapport à la route horizontale, diminuer la charge du moteur à décélération identique. Ne sachant pas dans quelle mesure la charge moteur serait diminuée, il a été convenu de retenir la même formule qu'en décélération sur route horizontale.

3.6.3 - Descente

Il a été décidé d'adopter pour les VL en descente une contribution moteur identique à celle sur route horizontale à même allure.

3.6.3.1 - Descente, vitesse stabilisée

Pour les VL en descente, les observations expérimentales et les réflexions théoriques concluent également à l'absence d'effet visible à même rapport de boîte. Un comportement de descente au frein moteur pourrait

induire, indirectement, un effet de la descente sur la contribution moteur, essentiellement à vitesse faible. Toutefois, en absence d'éléments plus précis et étant donnés les résultats en montée, il est décidé de ne pas retenir d'effet de la pente en descente : on adopte pour les VL en descente en allure stabilisée une contribution moteur identique à celle sur route horizontale en allure stabilisée.

3.6.3.2 - Descente, accélération

La descente favorise l'accélération et devrait donc, à accélération identique, diminuer la charge du moteur. Mais pour les déclivités usuelles on suppose, comme sur route horizontale, que le conducteur accélère autant que le permet son véhicule, et que la charge du moteur est de ce fait identique à l'accélération sur route horizontale. On utilise donc la même formule.

3.6.3.3 - Descente, décélération

Descente et décélération diminuent (potentiellement) le bruit moteur. Comme pour le cas de la vitesse stabilisée, une décélération au frein moteur pourrait induire un effet sur la contribution moteur. Il est cependant décidé de ne pas retenir d'effet de la pente en descente. La formule en décélération descente est identique à celle sur route horizontale à même allure.

3.6.4 - Exemple : élaboration de l'abaque composante moteur VL pour l'allure stabilisée

3.6.4.1 - Protocole de mesure

Le protocole de mesure a pour objectif d'évaluer le bruit émis par les véhicules légers circulant sous différentes configurations [vitesse/rapport de boîte]. Les paramètres mesurés sont :

Les données cinématiques

La vitesse est mesurée à l'aide de 5 cellules infrarouges disposées à 10 m d'intervalle sur le bord de la piste. Des plaques réfléchissantes sont disposées sur les faces latérales du véhicule testé. Lorsque le véhicule passe devant les cellules, un signal de topage est enregistré par la centrale d'acquisition. Ce signal de topage permet, lors du dépouillement des mesures, d'évaluer la vitesse et accessoirement de situer le véhicule lors de son passage devant les microphones.

Les paramètres mécaniques

Les caractéristiques des pneumatiques (marque et dimensions) ont été consignées sur le rapport de mesure. Le rapport de boîte est noté pour chaque passage du véhicule. On dispose par ailleurs de la fiche technique de chaque véhicule étudié. Cette fiche technique indique, entre autres, les caractéristiques mécaniques de la boîte de vitesse (rapports de réduction) et le rapport de pont.

Les données acoustiques

Les niveaux de pression acoustique (niveaux globaux pondérés A) sont mesurés à l'aide d'un microphone situé en bordure de piste, à 7.5 m de l'axe de passage du véhicule et à 1.2 m de hauteur. Cette géométrie répond aux préconisations des normes NF EN ISO 11819-1 [18] et S31-119 [20]. Le niveau retenu pour chaque passage de véhicule est le L_{max} .

3.6.4.2 - Détermination du régime moteur à partir de la mesure de vitesse

Le régime moteur peut être estimé à partir de la mesure de la vitesse de passage du véhicule et du rapport de boîte utilisé en utilisant comme informations :

- les caractéristiques mécaniques de la boîte de vitesse,
- les caractéristiques du pneumatique

Vitesse du véhicule et vitesse de rotation du moteur

Une boîte de vitesse est caractérisée par ses rapports de boîte $R_b(k)$ et son rapport de pont R_p . Le régime moteur n (en t/mn) est lié à la vitesse de rotation des roues n_{roue} par la relation :

$$n = n_{roue} \frac{R_p}{R_b(k)} = n_{roue} \cdot i(k) \quad (37)$$

soit, en utilisant la relation $n_{roue} = (60/2\pi) \times v/r$ où v est la vitesse de déplacement (en m/s) et r le rayon du pneumatique (en m) :

$$n = \frac{60}{2\pi} \frac{v}{r} \cdot i(k) \quad (38)$$

Rayon du pneumatique

Un pneumatique est caractérisé par 3 valeurs L, S et D :

- L : largeur du pneumatique (mm)
- S : 100 x hauteur/largeur du pneumatique
- D : diamètre de la jante (pouces)

La valeur en mètres de son rayon est donc¹⁸ :

$$r = \left[25.4 \cdot \frac{D}{2} + \frac{S \cdot L}{100} \right] \cdot 10^{-3} \quad (39)$$

3.6.4.3 - Les véhicules mesurés

L'objectif étant de constituer un échantillon représentatif du parc automobile français, les véhicules ont été choisis de sorte à couvrir au mieux l'éventail des cylindrées disponibles sur le marché actuel, en motorisation "essence" et en motorisation "diesel". Les principales caractéristiques de ces véhicules sont reportées dans le tableau 3.13.

Marque et Type	Motorisation	Kilométrage	Cylindrée	Pneumatiques
Citroën ZX	Diesel	47 700	1.9	Michelin MXT 175/65/14
Opel Corsa	Essence	6 700	1.7	Michelin Energy 165/70/13
Renault Mégane	Diesel	44 700	1.9	Michelin Classic 175/70/13
Citroën XM	Diesel	100	2.1	Michelin Energy 195/65/15
Opel Vectra	Essence	5 900	2.0	Michelin Energy 185/70/14
Ford Focus	Essence	1 400	2.0	Continental Contact 165/65/13
Opel Astra	Essence	23 200	2.0	Bridgestone 195/55/15
Citroën Saxo	Essence	32 400	1.2	Michelin MXT 155/70/13
Citroën Xantia	Diesel	16 800	2.1	Michelin Energy 185/65/15
Ford Fiesta	Essence	41 000	1.4	Continental Contact 165/65/13
Renault Clio 1	Essence	81 300	1.6	Michelin MXT 155/70/13
Renault Clio 2	Essence	38 000	1.2	Dunlop SP 9 155/70/13
Ford Galaxy	Diesel	21 400	1.9	Continental Contact 205/60/15
Ford Mondeo	Diesel	1 400	1.8	Michelin Pilot HX 205/55/15

Tableau 3.13 - Principales caractéristiques des véhicules étudiés

3.6.4.4 - Passages effectuées pour chaque véhicule

- Pour chaque rapport de boîte, dix passages sur toute la gamme de vitesse couverte par le rapport engagé.
- Dix passages au point mort, moteur fonctionnant au ralenti (détermination du bruit de roulement). Les vitesses de passage, supérieures à 50 km/h, sont suffisantes pour "masquer" le bruit du moteur.

Les lois d'évolution du niveau de bruit en fonction de la vitesse, construites pour chaque véhicule et pour chaque rapport de boîte, peuvent s'avérer linéaires (eq. 40, $C = 0$) ou quadratiques (eq. 40, $C \neq 0$). Les lois

¹⁸On suppose pour simplifier que valeur "à vide" et valeur dynamique sont identiques

quadratiques concernent essentiellement les niveaux de bruit mesurés sur les véhicules diesels pour les faibles rapports de boîte (bruit moteur prédominant),

$$L_{Amax}(v) = A + B \log(v/v_{ref}) + C \log^2(v/v_{ref}) \quad (40)$$

3.6.4.5 - Décomposition bruit mécanique / bruit de roulement

Le niveau maximum au passage L_{Amax} (niveau global exprimé en dB(A)) de chaque véhicule est exprimé comme étant la somme énergétique de deux niveaux : l'un, L_m , correspondant à la contribution des sources moteur et organes mécaniques associés, l'autre, L_r , correspondant à la contribution de la source contact pneumatique-chaussée [14], [15] :

$$L_{Amax} = L_m(n) \oplus L_r(v) \quad (41)$$

où \oplus indique une addition énergétique des niveaux de bruit :

$$L_1 \oplus L_2 = 10 \log(10^{L_1/10} + 10^{L_2/10}) \quad (42)$$

L_m est stipulé fonction du régime moteur et est formulé :

$$L_m = A_m + B_m \cdot \log(n/n_{ref}) + C_m \cdot \log^2(n/n_{ref}) \quad n_{ref} = 1000 \text{ t/min} \quad (43)$$

L_r est stipulé fonction de la vitesse et du revêtement de la piste d'essai. Il est formulé :

$$L_r = A_r + B_r \cdot \log(v/v_{ref}) \quad v_{ref} = 90 \text{ km/h} \quad (44)$$

Les coefficients A_m, B_m, C_m, A_r, B_r sont déterminés par procédure minimisation (Eq 45) de l'écart quadratique moyen entre les niveaux mesurés et les niveaux calculés (Eqs 41, 43, 44).

$$A_m, B_m, C_m, A_r, B_r \text{ minimise } \sum_{i=1}^N [L_{Amax}(v_i) - L_m(n_i, A_m, B_m, C_m) \oplus L_r(v_i, A_r, B_r)]^2 / N \quad (45)$$

Pour chaque véhicule la procédure est appliquée sur l'ensemble des $L_{A,max}$ i.e. tous rapports de boîte confondus. Une illustration de résultat est donnée Figure 3.14.

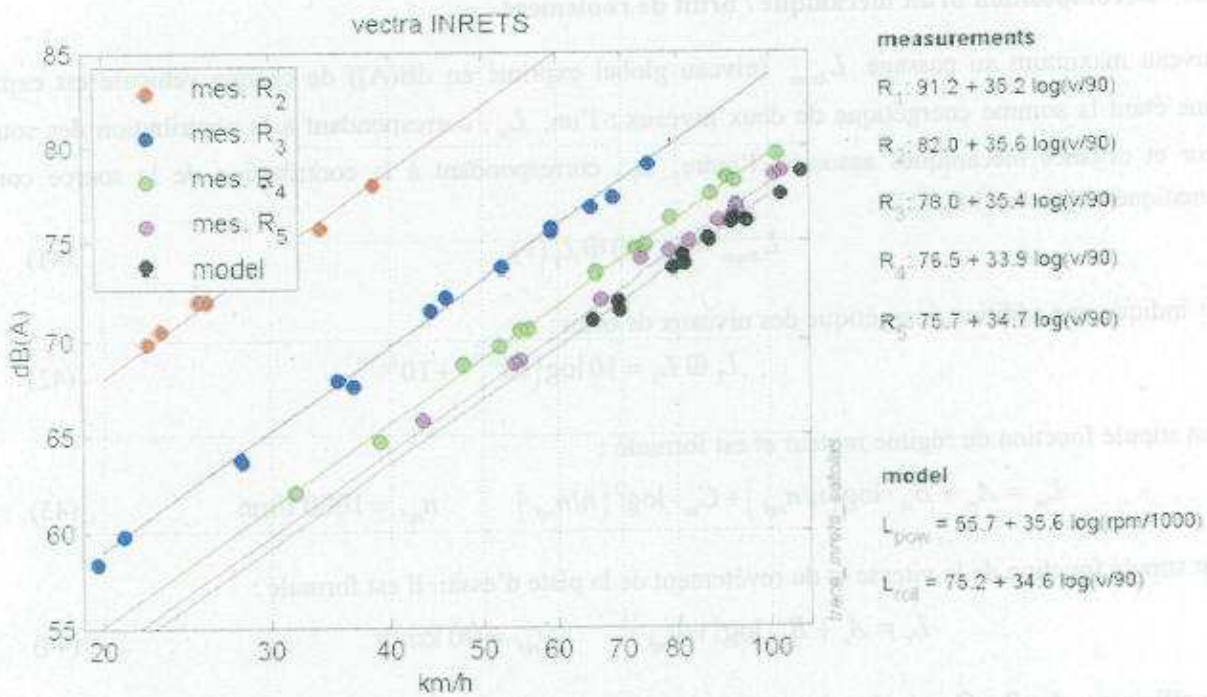


Figure 3.14 - Exemple de détermination des composantes moteur et roulement" pour un véhicule Diesel. Les points représentent les niveaux de bruit mesurés. Les niveaux totaux reconstitués (eq. 40) apparaissent en lignes continues. Le tableau placé sous la figure indique, pour quelques vitesses caractéristiques, le rapport de boîte utilisé, le régime moteur, les composantes moteur et roulement et le niveau total déterminé à partir de ces composantes.

3.6.4.6 - Prise en compte du comportement de conduite

Les observations expérimentales exposées ci-dessus ont été établies pour des véhicules circulant sur piste d'essai. Les conditions d'utilisation de ces véhicules sont différentes de celles habituellement rencontrées dans un trafic courant (absence de trafic, d'aménagements de voirie, etc.). La prise en compte de l'utilisation réelle d'un véhicule intégré dans un flot de trafic impliquerait le recours à une expérimentation complémentaire lourde basée sur une instrumentation embarquée permettant de recueillir les informations utiles (paramètres cinématiques et mécaniques tels que la vitesse, l'allure, le régime moteur, le rapport de boîte utilisé,...). Ne pouvant envisager ce type d'expérimentation pour la réactualisation des abaques, nous nous sommes appuyés sur une étude expérimentale réalisée dans le cadre de l'établissement des cycles de conduite pour la mesure des polluants émis par les véhicules [24]. Cette étude a conduit à l'élaboration d'une base de données contenant des enregistrements des paramètres cinématiques et mécaniques effectués sur des véhicules conduits par leur propriétaires sur une période de quelques semaines. Ces paramètres sont par conséquent représentatifs de l'usage réel des véhicules. Il faut cependant noter que les informations relatives à l'environnement dans lequel évoluent les véhicules (parcours, type d'axe parcouru,...) ne sont pas renseignées. Trois campagnes de mesures ont été effectuées à l'échelle européenne (1985, 1991, 1995) : sur un total de 52 véhicules (du parc français) seuls ont été retenus pour l'évaluation ceux équipés d'une boîte de vitesse à 5 rapports, soit 37 véhicules. Les enregistrements permettent de déterminer l'utilisation du rapport de boîte en fonction de la vitesse lors d'une

circulation à vitesse stabilisée. Le critère de stabilité de la vitesse correspond aux plages "stabilisées" durant lesquelles la variation de l'allure n'excède pas $\pm 0.5 \text{ ms}^{-2}$ pendant au moins 4 secondes¹⁹. Ce traitement a permis d'établir un histogramme d'utilisation des rapports de boîte en fonction de la vitesse (cf. Fig. 3.15).

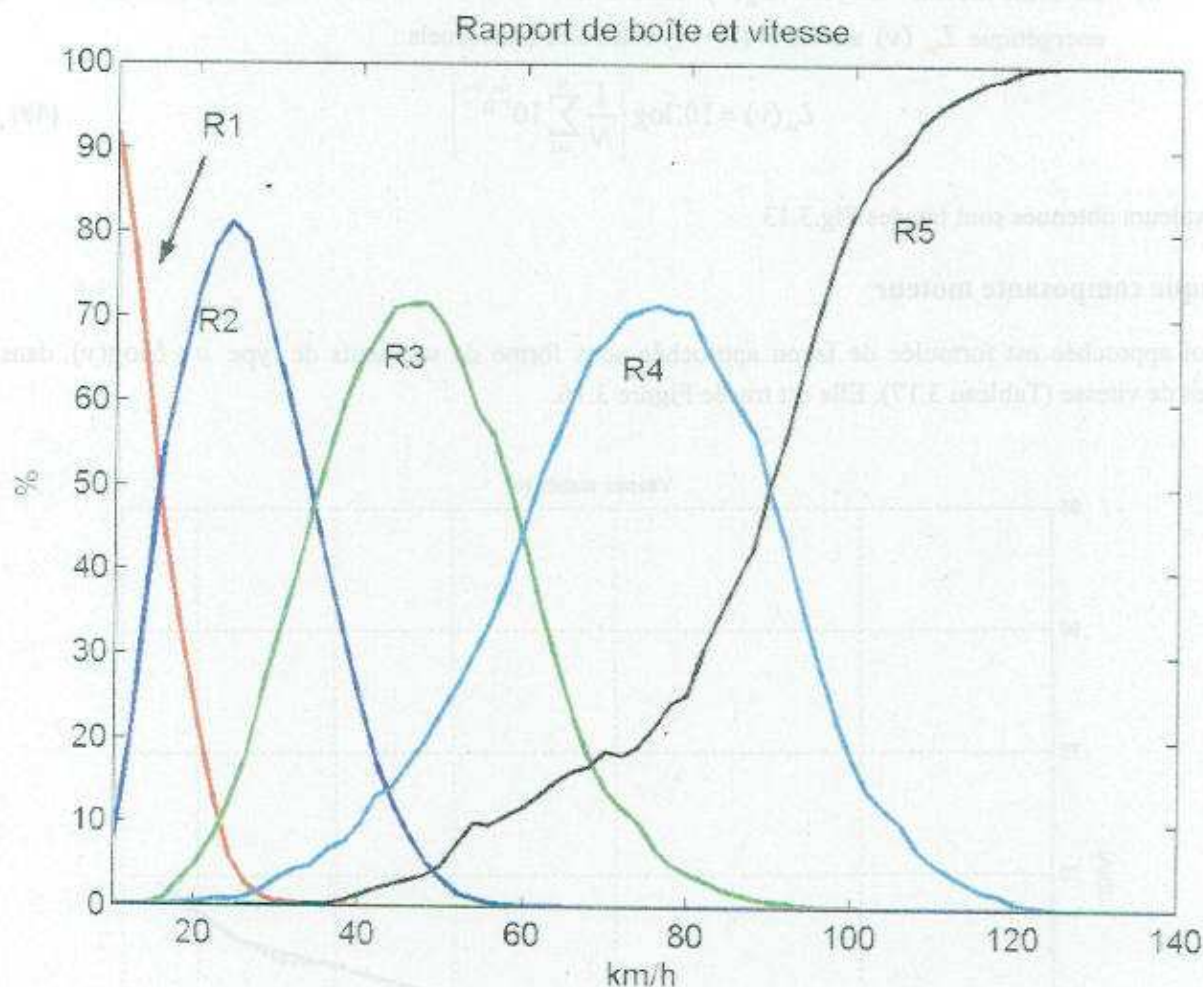


Figure 3.15 - Histogramme d'utilisation des rapports de boîte en fonction de la vitesse

Evaluation de la composante moteur prenant en compte le comportement de conduite

L'évaluation de la composante moteur a été effectuée de la façon suivante :

1. On considère les lois d'évolution du bruit moteur en fonction du régime moteur établies pour chaque véhicule étudié :

$$L_{m_i}(R_i, v) = A_{m_i} + B_{m_i} \log \frac{n(R_i, v)}{n_{ref}} + C_{m_i} \log^2 \frac{n(R_i, v)}{n_{ref}} \quad (46)$$

2. On calcule pour chaque véhicule et à chaque vitesse le niveau de "bruit moteur" pondéré (usage réel du véhicule : utilisation possible de rapports différents) à l'aide de l'histogramme "EUREV" (cf. Fig. 3.12). L'évaluation est effectuée entre 20 km/h et 130 km/h par pas de 2 km/h :

$$L_{m_i}(v) = 10 \log \left[\sum_{R_i} \alpha_i 10^{\frac{L_{m_i}(R_i, v)}{10}} \right] \quad (47)$$

¹⁹L'effet de l'accélération sur le bruit émis par un véhicule est significatif lorsque celle-ci est supérieure à $\pm 0.5 \text{ ms}^{-2}$ [31]

où α_i est le pourcentage d'utilisation du rapport i à la vitesse v .

- Le bruit moteur "moyen" $L_m(v)$ émis à une vitesse v donnée est déterminée par la moyenne énergétique $L_m(v)$ sur les N ($N=14$) véhicules individuels :

$$L_m(v) = 10 \cdot \log \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_{m_i}(v)}{10}} \right] \quad (48)$$

Les valeurs obtenues sont tracées Fig.3.13

Abaque composante moteur

La loi approchée est formulée de façon approchée sous forme de segments de type $a + b \log(v)$ dans trois plages de vitesse (Tableau 3.17). Elle est tracée Figure 3.16.

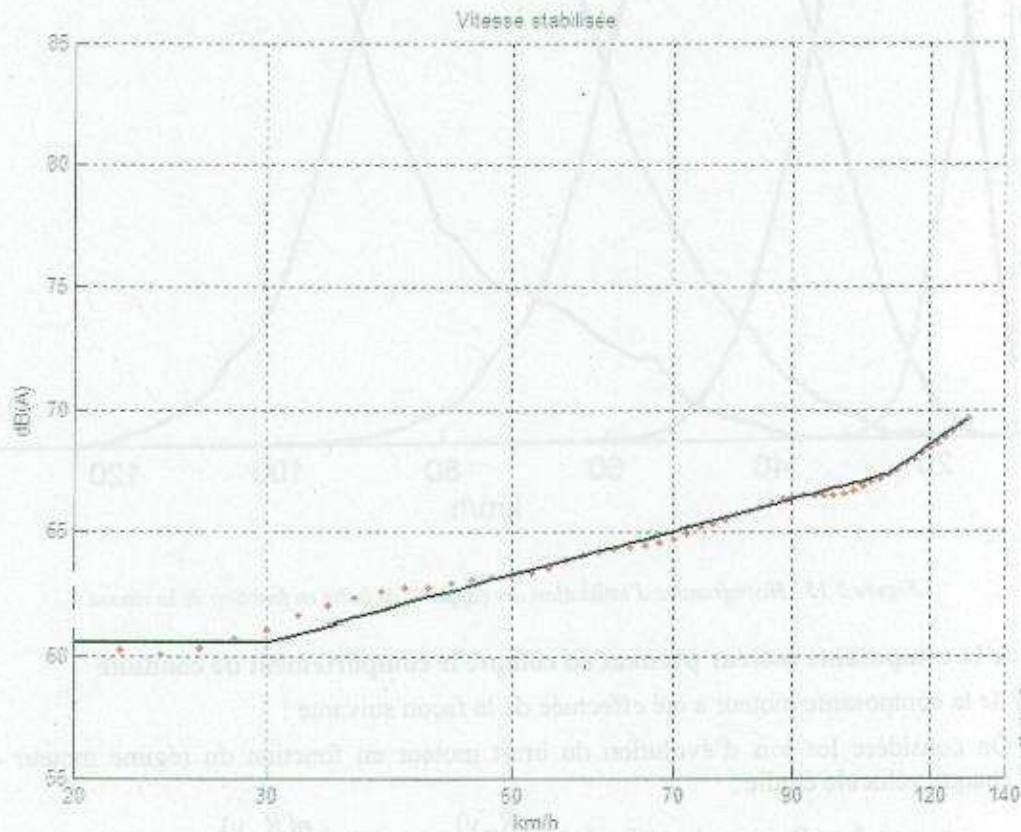


Figure 3.16 - Composante moteur déterminée à partir des 14 véhicules mesurés sur piste d'essai et de l'histogramme de pondération "EUREY" (figure 3.13) et linéarisation. En pointillés : évaluation par pas de 2km/h. En trait continu : loi approchée.

V [km/h]	20 à 30	30 à 110	110 à 130
L_m [dB(A)]	60.6	$66.3 + 12 \log(V/90)$	$64.6 + 31.3 \log(V/90)$

Tableau 3.17 - Réactualisation de l'abaque VL circulant à vitesse stabilisée : formulation retenue pour la composante moteur.

Les valeurs correspondent aux expressions en L_{Amax} .

3.7 - Démarche de production des composantes moteur PL

Cette démarche considère deux domaines :

- les basses et moyennes vitesses, où compte tenu des changements de rapport de boîte, la composante moteur peut être considéré comme étant indépendant de la vitesse,
- les hautes vitesses où, le dernier rapport de boîte étant atteint, la composante moteur augmente avec la vitesse.

3.7.1 - Plage de vitesse 20-70 km/h

3.7.1.1 - PL à allure stabilisée sur route horizontale

Des mesures sur piste d'essai ont été réalisées sur 7 tracteurs de différentes marques et de différentes générations, attelés chacun à deux remorques différentes (une vide et une chargée), pour des vitesses allant de 20 km/h à plus de 80 km/h par pas de 10 km/h. Pour chaque vitesse de passage, le chauffeur a choisi le rapport de boîte lui paraissant le plus adapté. La recherche d'un comportement de conduite représentatif d'un usage réel a donc été intégrée directement aux conditions des essais.

On a d'abord calculé une régression d'ordre 2 sur les mesures où la vitesse est inférieure à 60 km/h. Cette courbe a ensuite été décomposée comme une somme d'une composante roulement fonction linéaire du logarithme de la vitesse et d'une composante moteur constante. C'est cette dernière qui a été retenue comme composante moteur.

L'hypothèse d'une composante moteur en LAm_{max} indépendante de la vitesse entre 20 et 70 km/h est justifiée par l'allure des résultats de mesures obtenus et par le fait que les conducteurs de poids lourds, disposant d'un grand nombre de rapports de boîte, utilisent leur moteur sur une faible plage de variation du régime moteur.

La validité de ces résultats a ensuite été vérifiée par comparaison avec des résultats de mesures effectuées ultérieurement sur 7 véhicules supplémentaires.

3.7.1.2 - PL en accélération sur route horizontale

Des mesures au passage sur PL du trafic ont été réalisées aux abords de deux carrefours giratoires. Environ 800 poids lourds ont été mesurés, en des points situés en sortie de giratoire et à 100 m, 200 m et 400 m de la sortie des giratoires. Les vitesses relevées vont de 25 à 80 km/h.

La composante roulement est dans un premier temps prise égale à la valeur de la régression polynomiale des mesures à une vitesse de 80 km/h, à laquelle on ajoute une variation en $31 \log(V)$ (variation du roulement pour un revêtement de catégorie 2, catégorie à laquelle appartiennent les revêtements mesurés).

On ajoute à cette composante roulement une composante moteur indépendante de la vitesse, que l'on ajuste de manière à minimiser la somme des carrés des écarts de cette construction avec la régression des mesures, pour les vitesses faibles, c'est à dire comprises entre 20 et 40 km/h. La composante roulement est ensuite réajustée en lui retranchant la composante moteur trouvée. On vérifie pour les vitesses intermédiaires (de 40 à 80 km/h) que la construction est en accord avec les mesures.

Cette méthodologie est appliquée séparément sur les deux sites. Un troisième site, fournissant des données incomplètes, n'a pu être exploité, mais la cohérence des mesures avec les autres sites a été vérifiée.

Pour chaque site, les écarts des mesures par rapport à la construction obtenue sont faibles (dans chaque tranche de 10 km/h, la moyenne des écarts entre la mesure au passage de chaque véhicule et la construction est largement inférieure au dB).

Les constructions obtenues en bruit global pour les deux sites sont proches puisque leurs valeurs diffèrent d'environ 1 dB(A) aux basses et hautes vitesses. La différence en composante moteur est d'environ 1,5 dB(A). La valeur de la composante moteur retenue est la moyenne des composantes moteurs des deux sites. Elle a été arrondie au dB supérieur pour se rapprocher des résultats des mesures du troisième site. On peut noter qu'elle est supérieure de 5dB à celle obtenue pour une allure stabilisée.

Exemple sur un site

La Figure 3.18 présente les poids lourds mesurés sur le premier site. La régression polynomiale (en noir) sur toutes les mesures donne un niveau de bruit à 80km/h de 87,1dB(A).

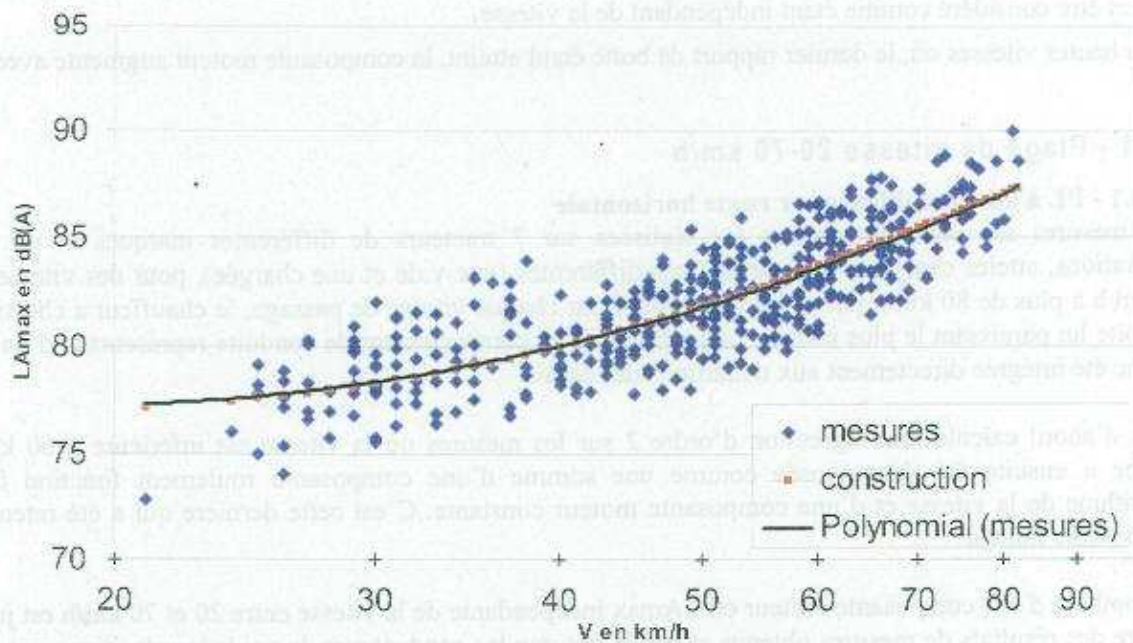


Figure 3.18 - Détail de la méthode sur un site (PL en accélération sur route horizontale)

La construction (en rouge) est obtenue par somme d'une composante roulement égale à $87,1 + 31 \log(V/80)$ et d'une composante moteur constante que l'on détermine de manière à minimiser la somme des carrés des écarts de cette construction avec la régression des mesures, pour les vitesses faibles, c'est à dire comprises entre 20 et 40 km/h. La composante moteur trouvée ici est de 76,5dB(A). La composante roulement est donc égale à la différence entre le niveau de bruit de la régression à 80km/h (87,1dB(A)) et cette composante moteur de 76,5dB(A), soit 86,7dB(A). On cherche alors à ajuster la composante moteur en reprenant la démarche avec cette valeur de composante roulement. Dans ce cas, aucun ajustement n'est nécessaire.

3.7.1.3 - PL en décélération sur route horizontale

Des mesures aux abords d'un carrefour giratoire (à 25 m, 50 m et à 100 m de l'entrée du giratoire) ont été réalisées, totalisant environ 300 PL du trafic. Les vitesses relevées vont de 20 à 80 km/h.

La régression effectuée sur les mesures réalisées à 100 m de l'entrée du giratoire étant inférieures de 3dB(A) à celles des points de mesure plus proches, elles n'ont été prises en compte que dans le calcul de la composante roulement (on considère qu'elles ne correspondent pas à de la décélération).

La valeur de la composante roulement a été obtenue en prenant en compte la vingtaine de véhicules dont la vitesse se trouvait comprise entre 65 et 80 km/h. Il s'agit de la moyenne de ces mesures ramenées à 80 km/h en appliquant une pente forfaitaire de 31 (pente du Roulement pour un revêtement de catégorie 2, catégorie à laquelle appartient le revêtement mesuré).

Comme dans le cas de l'accélération, on ajoute à cette composante roulement une composante moteur, que l'on ajuste de manière à minimiser la somme des carrés des écarts de cette construction avec la régression des mesures, pour les vitesses faibles, c'est à dire comprises entre 20 et 40 km/h. La composante roulement est ensuite réajustée en retranchant la valeur de la composante moteur trouvée.

Les écarts des mesures par rapport à la construction obtenue sont faibles (dans chaque tranche de 10 km/h, la moyenne des écarts entre la mesure au passage de chaque véhicule et la construction est largement inférieure au dB).

On peut noter que la valeur de la composante moteur trouvée est la même que celle obtenue pour une allure stabilisée.

3.7.1.4 - PL à allure stabilisée en montée

Des mesures de PL du trafic ont été réalisées sur 5 sites présentant des déclivités variant de 3 % à 6 %. Chaque site comportait en règle générale au moins trois points de mesure dans le sens de la montée (jusqu'à huit points sur l'un des sites) et un point de mesure en section horizontale. En chaque point ont été mesurés au minimum 80 PL.

Le domaine de vitesse observé était suffisamment étendu (30 à 90 km/h) pour permettre d'évaluer la composante moteur. La démarche a été appliquée en deux temps :

- connaissant la composante moteur sur route horizontale à allure stabilisée (voir plus haut), la composante Roulement associée au revêtement de chaussée du site a été évaluée sur le point de mesure en section horizontale, en faisant l'hypothèse que la composante roulement est la même sur la section horizontale et dans la montée ;
- la composante moteur associée à chaque point de mesure en montée a été recherchée de manière à ajuster au mieux les mesures (selon la même méthode que dans le cas de l'accélération) ;
- les valeurs de L_{moteur} évaluées pour les différentes déclivités ont été jugées suffisamment différenciées pour justifier de prendre en compte dans cette composante le paramètre "déclivité" de façon quantitative et continue plutôt que qualitative.

Les écarts des mesures par rapport à la construction obtenue sont faibles (dans chaque tranche de 10 km/h, la moyenne des écarts entre la mesure au passage de chaque véhicule et la construction est largement inférieure au dB).

3.7.1.5 - PL à allure stabilisée en descente

Des mesures de PL du trafic ont été réalisées sur un site en descente de 6 %. Elles concernent environ 250 véhicules de 30 à 70 km/h.

Des mesures en section horizontale sur le même revêtement n'ayant pas été possible, la composante roulement a du être forfaitisée à la valeur moyenne de la technique (issu de la base de données).

La composante moteur a ensuite été recherchée de manière à ajuster au mieux les mesures (même démarche que pour l'accélération).

On notera cependant que la valeur de la composante moteur obtenue est très sensible à la valeur de la composante roulement retenue comme hypothèse (une variation de 2,5 dB de la composante roulement entraîne une variation de la composante moteur de 5 dB).

Les écarts des mesures par rapport à la construction obtenue sont faibles (dans chaque tranche de 10 km/h, la moyenne des écarts entre la mesure au passage de chaque véhicule et la construction est largement inférieure au dB).

Faute d'information pour les valeurs intermédiaires de la déclivité, la même règle de variation que pour la montée a été adoptée, c'est à dire que l'on considère une variation linéaire entre 2 et 6%.

3.7.2 - Vitesses élevées : plage de vitesse 70-100 km/h

Lors des mesures relatives aux sept poids lourds sur piste d'essai (voir le chapitre « PL à allure stabilisée sur route horizontale »), les régimes moteur ont été relevés lors de chaque passage par lecture directe du compteur. Une étude ultérieure [25] a appliqué la démarche de décomposition en deux composantes moteur (fonction du régime moteur) et roulement (fonction de la vitesse) appliquée précédemment pour les VL (voir « Démarche de production des composantes moteur VL »). La composante moteur a ensuite été exprimée en fonction de la vitesse, compte tenu des caractéristiques mécaniques des véhicules et des rapports de boîte adoptés par les conducteurs. Pour la tranche de vitesses 20-70 km/h, la moyenne des composantes moteur des sept PL s'avère très proche de la valeur obtenue par la démarche initiale.

Pour la tranche de vitesses 70-100 km/h, la composante moteur de chaque PL a été extrapolée en supposant le même comportement de conduite (sélection du rapport de boîte permettant autant que possible le même régime

moteur). La moyenne des composantes moteur des sept PL ainsi obtenues a été retenue pour les nouvelles valeurs d'émission sonore. Cette composante moteur n'est plus indépendante de la vitesse ; au-delà de 70 km/h, la plupart des PL utilisent leur rapport de boîte le plus élevé, et le régime moteur augmente avec la vitesse. Au-delà de 70km/h, la composante moteur exprimée en L_{Amax} augmente donc en $13\log(V)$ sur route horizontale à allure stabilisée. Cette variation en $13\log(V)$ est également appliquée aux autres cas en faisant l'hypothèse que dans chaque configuration le conducteur ne change pas de rapport de boîte sur cette plage de vitesse. Il s'ensuit que les composantes moteur des différents cas ne diffèrent que d'une constante indépendante de la vitesse.

3.7.3 - Vitesses basses : plage de vitesse 5-20 km/h

La démarche utilisée fournit une composante moteur pour des vitesses supérieures à 20 km/h, il a été décidé de considérer que cette valeur est également constante entre 5 et 20 km/h. En effet, à 20 km/h les poids lourds sont déjà à un rapport de boîte élevé, et on considère qu'ils disposent donc d'un nombre suffisant de rapports de boîte à partir de 5 km/h pour conduire à régime moteur constant.

3.7.4 - Combinaisons allure * déclivité

Les composantes moteur correspondant à l'accélération et à la décélération en montée et descente, sont déduites selon le même principe que pour les VL (voir le chapitre 3.6). Ce principe est rappelé dans les tableaux 3.19, 3.20 et 3.21 ci-dessous :

	montée $2\% \leq p \leq 6\%$	descente $2\% \leq p \leq 6\%$
accélération	max(accélération*route horizontale ; allure stabilisée*montée)	= accélération*route horizontale
décélération	= décélération*route horizontale	max(décélération*route horizontale ; allure stabilisée*descente)

Tableau 3.19 - Principe de combinaison allure / déclivité

Ce qui, appliqué aux PL, donne :

V - km/h	5 à 70	70 à 100
L_{moteur}	$73 + \Delta L$	$73,8 + 13 \log(V/80) + \Delta L$

Tableau 3.20 - Formulation retenue pour la composante moteur des PL pour toutes les allures et toutes les déclivités (expressions en L_{Amax})

ΔL est un correctif indépendant de la vitesse, fonction de l'allure et de la déclivité.

ΔL	déclivité	
	montée $2\% \leq p \leq 6\%$	descente $2\% \leq p \leq 6\%$
accélération	$\max[2.(p - 2) ; 5]$	5 dB(A)
décélération	0 dB(A)	$1.(p - 2)$

p en % (valeur absolue)

Tableau 3.21 - Valeurs du correctif ΔL

Allure stabilisée

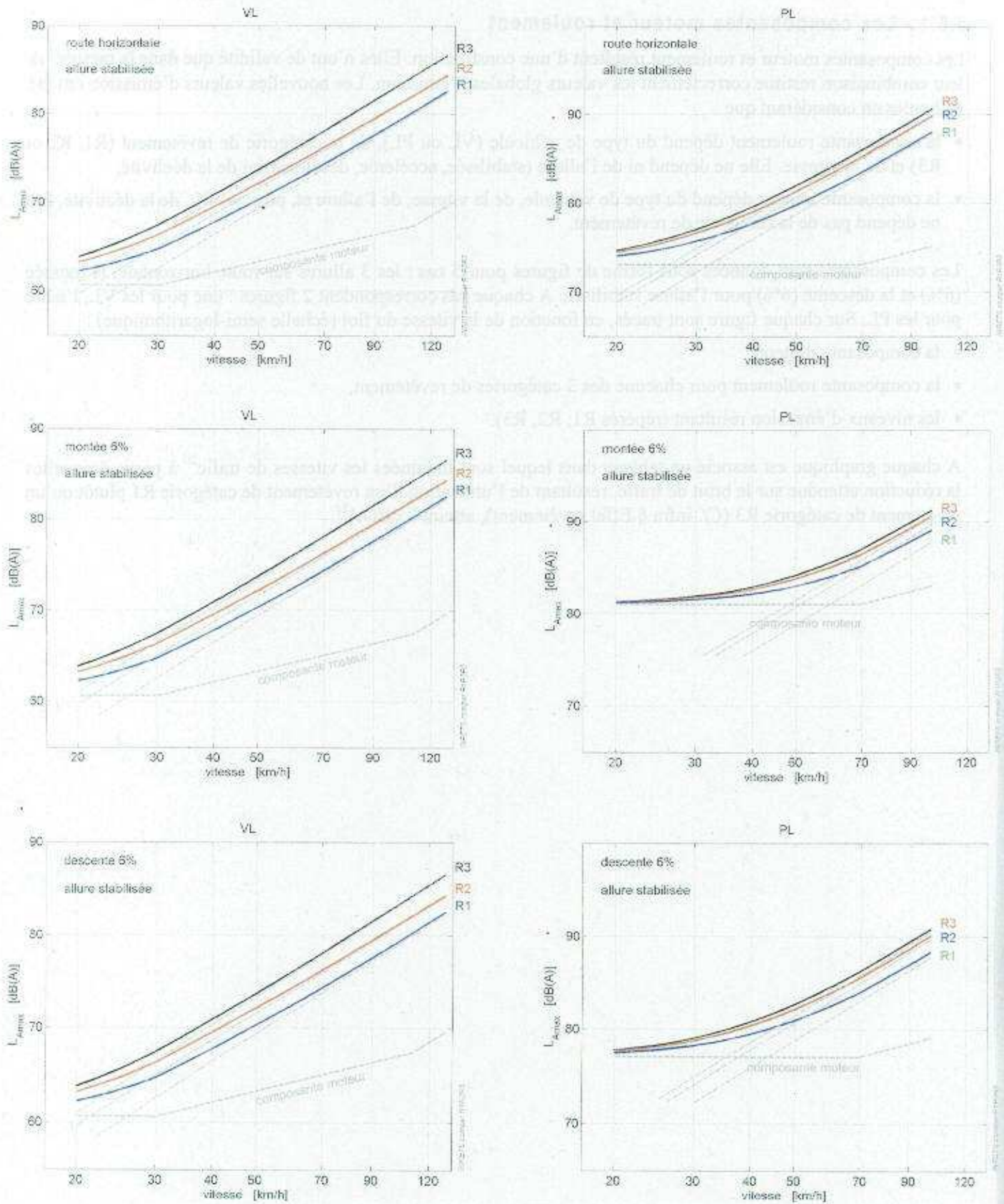


Figure 3.22 - Nouvelles valeurs d'émission. Allure stabilisée. Figures du haut : route horizontale. Figures du milieu : montée (6%). Figures du bas : descente (6%). Gauche : trafic VL, Droite : trafic PL.

3.8 - Commentaires sur les nouvelles valeurs d'émission unitaires

3.8.1 - Les composantes moteur et roulement

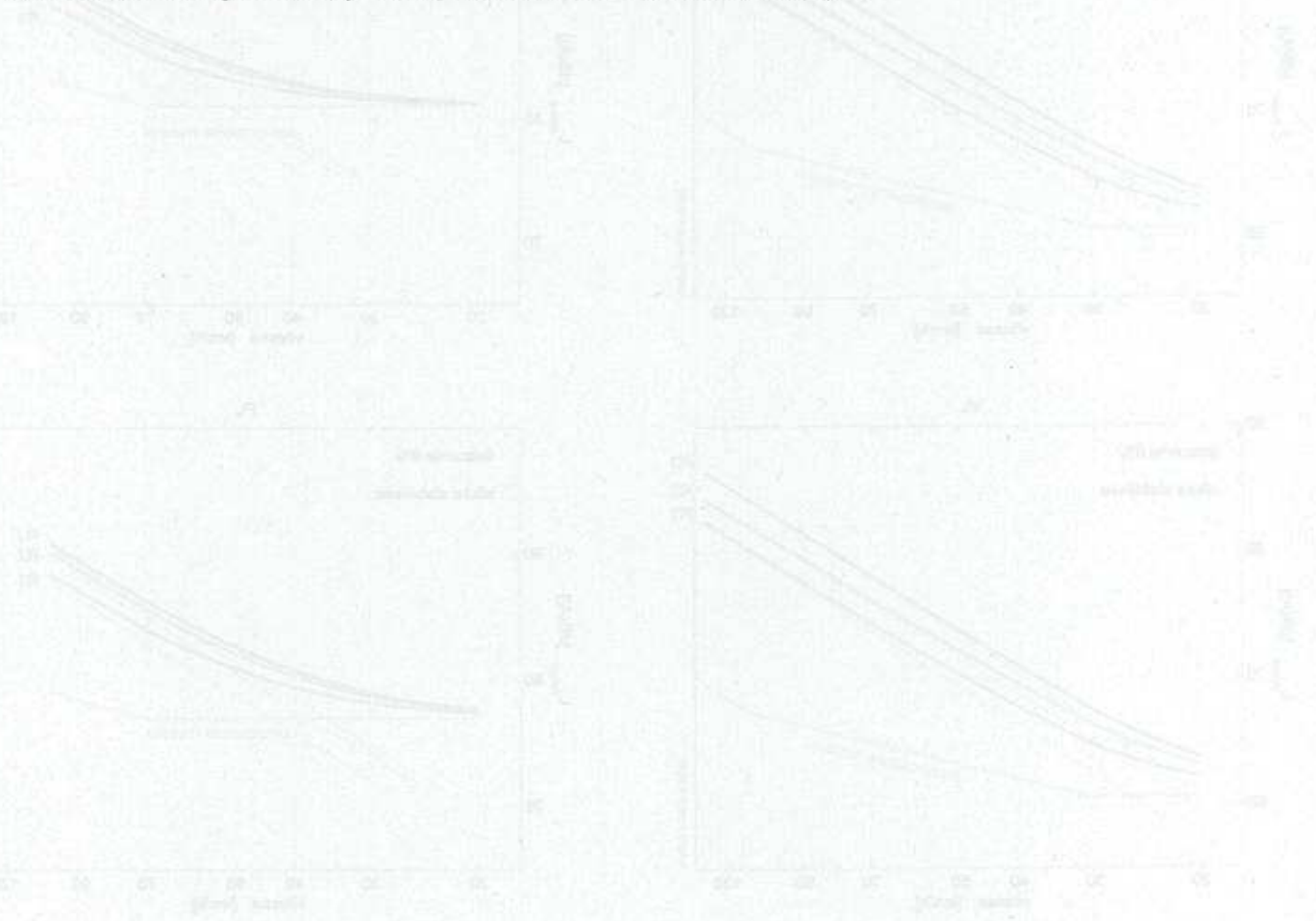
Les composantes moteur et roulement résultent d'une construction. Elles n'ont de validité que dans la mesure où leur combinaison restitue correctement les valeurs globales d'émission. Les nouvelles valeurs d'émission ont été élaborées en considérant que :

- la composante roulement dépend du type de véhicule (VL ou PL), de la catégorie de revêtement (R1, R2 ou R3) et de la vitesse. Elle ne dépend ni de l'allure (stabilisée, accélérée, décélérée) ni de la déclivité,
- la composante moteur dépend du type de véhicule, de la vitesse, de l'allure et, pour les PL, de la déclivité. Elle ne dépend pas de la catégorie de revêtement.

Les composantes sont données sous forme de figures pour 5 cas : les 3 allures sur route horizontale, la montée (6%) et la descente (6%) pour l'allure stabilisée. A chaque cas correspondent 2 figures : une pour les VL, l'autre pour les PL. Sur chaque figure sont tracés, en fonction de la vitesse du flot (échelle semi-logarithmique) :

- la composante moteur,
- la composante roulement pour chacune des 3 catégories de revêtement,
- les niveaux d'émission résultant (repérés R1, R2, R3).

A chaque graphique est associé un tableau dans lequel sont indiquées les vitesses de trafic²⁰ à partir desquelles la réduction attendue sur le bruit de trafic, résultant de l'utilisation d'un revêtement de catégorie R1 plutôt qu'un revêtement de catégorie R3 (Cf. infra § Effet revêtement), atteint 2 dB(A)²¹.



²⁰Valeurs approchées à 5 km/h

²¹valeur du critère acoustique utilisée pour la définition de la "modification significative" d'une infrastructure.

Allure stabilisée	VL	PL
Route horizontale	25 km/h	40 km/h
Montée (6%)	25 km/h	80 km/h
Descente (6%)	25 km/h	55 km/h

Tableau 3.23 - Vitesses à partir desquelles $L_i(R3) - L_i(R1) \geq 2$ dB(A)

Allure accélérée - Route horizontale

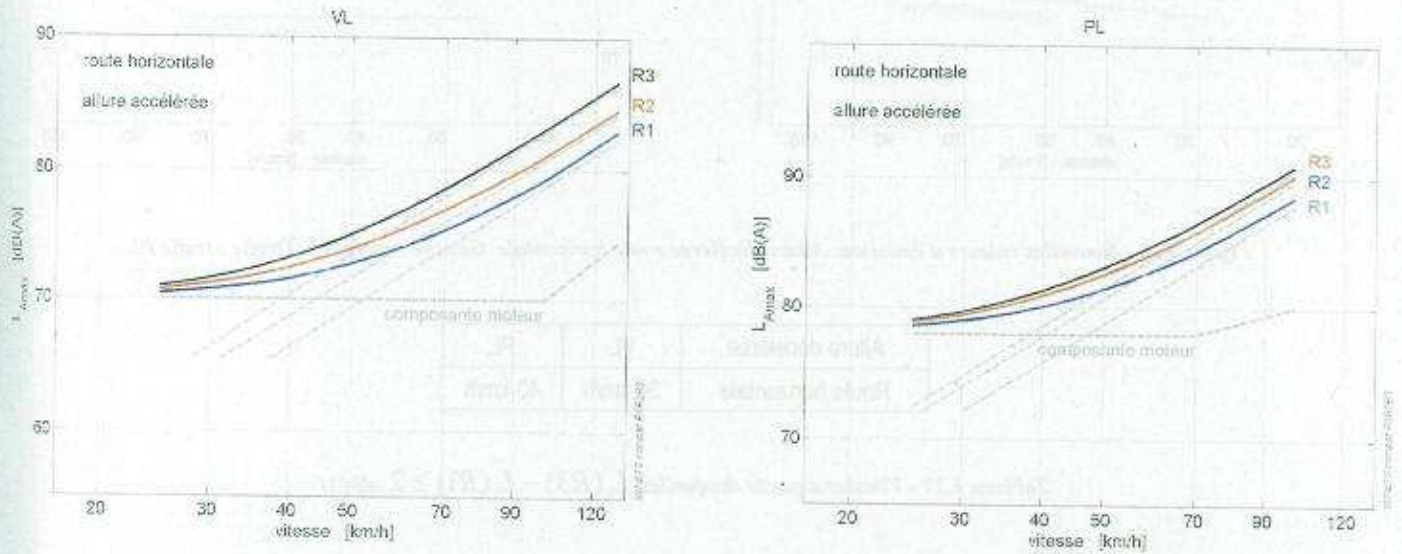


Figure 3.24 - Nouvelles valeurs d'émission. Allure accélérée route horizontale. Gauche : trafic VL. Droite : trafic PL.

Allure accélérée	VL	PL
Route horizontale	45 km/h	60 km/h

Tableau 3.25 - Vitesses à partir desquelles $L_i(R3) - L_i(R1) \geq 2$ dB(A)

Allure décélérée - Route horizontale

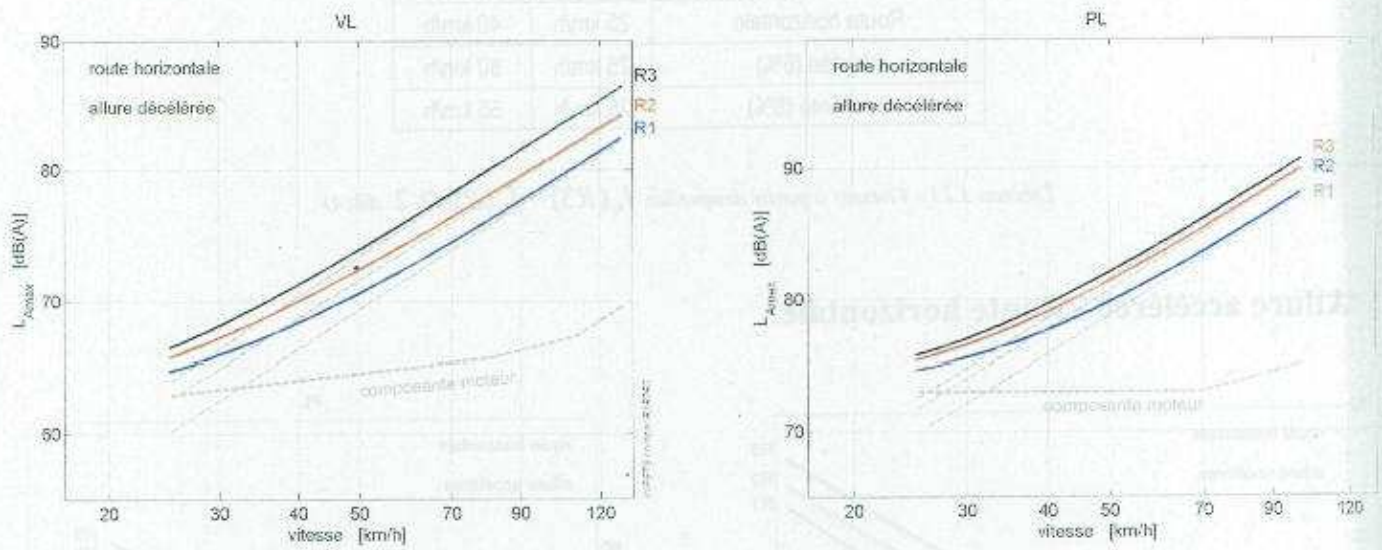


Figure 3.26 - Nouvelles valeurs d'émission. Allure décélérée route horizontale. Gauche : trafic VL. Droite : trafic PL.

Allure décélérée	VL	PL
Route horizontale	30 km/h	40 km/h

Tableau 3.27 - Vitesses à partir desquelles $L_i(R3) - L_i(R1) \geq 2$ dB(A)

VL	PL
30 km/h	40 km/h

3.8.2 - Effet revêtement

L'effet revêtement est la différence attendue sur le bruit de trafic résultant de l'utilisation d'un revêtement de catégorie R1 plutôt qu'un revêtement de catégorie R3.

Allure stabilisée

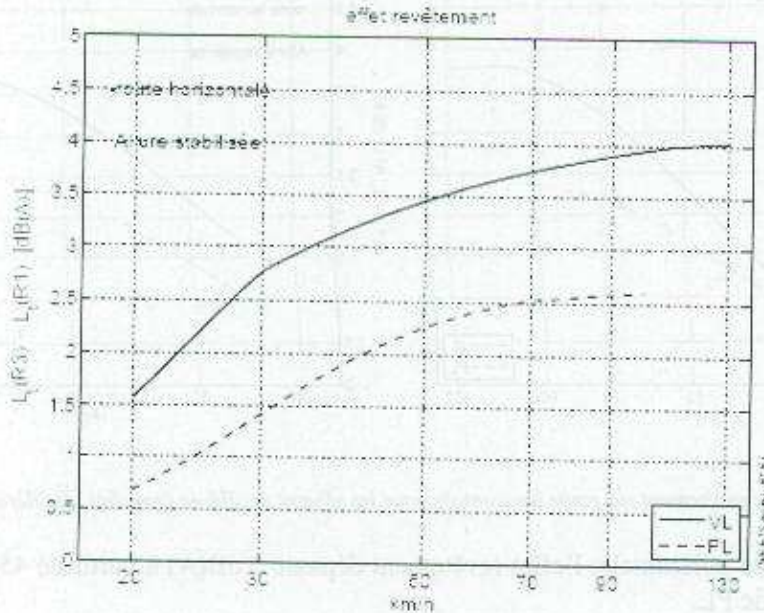


Figure 3.28 - Effet revêtement sur route horizontale pour l'allure stabilisée

L'effet en allure stabilisée sur route horizontale est tracé Figure 3.28. Il est quasiment supérieur à 2 B(A) dès 25 km/h pour un trafic VL et 40 km/h pour un trafic PL.

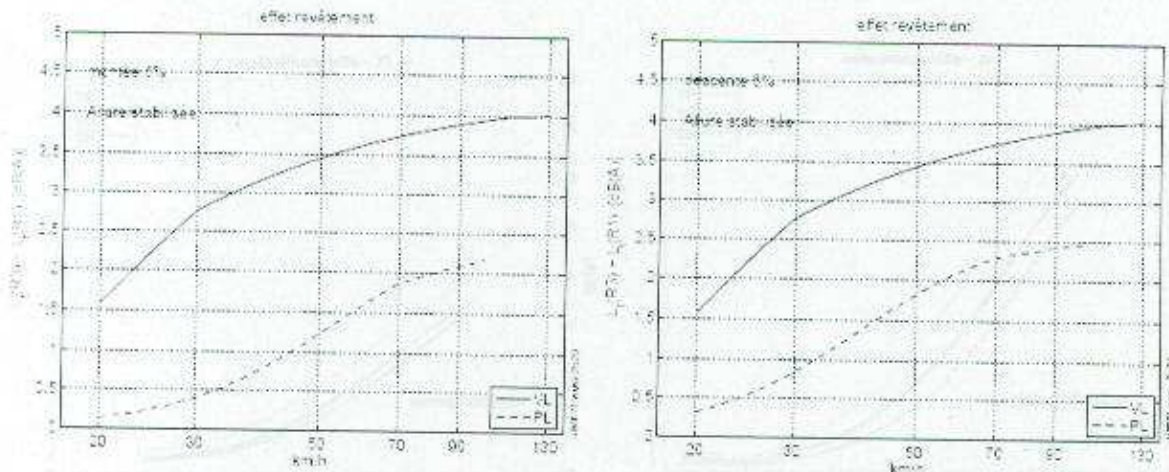


Figure 3.29 - Effet revêtement sur une rampe de 6% en montée (gauche) et descente (droite). Allure stabilisée

Une déclivité n'affecte pas le niveau d'émission VL²². L'effet revêtement pour cette catégorie est donc le même que sur route horizontale. Pour le trafic PL, l'effet revêtement est négligeable en montée de 6% : il n'est

²² Les nouvelles valeurs sont établies pour des déclivités inférieures à 6 %.

supérieur à 2 dB(A) qu'à partir de 80 km/h (Figure 3.29 graphique de gauche). En descente de 6 % par contre, l'effet revêtement dépasse 2 dB(A) à partir de 55 km/h (Figure 3.29 graphique de droite).

Allures accélérée et décélérée

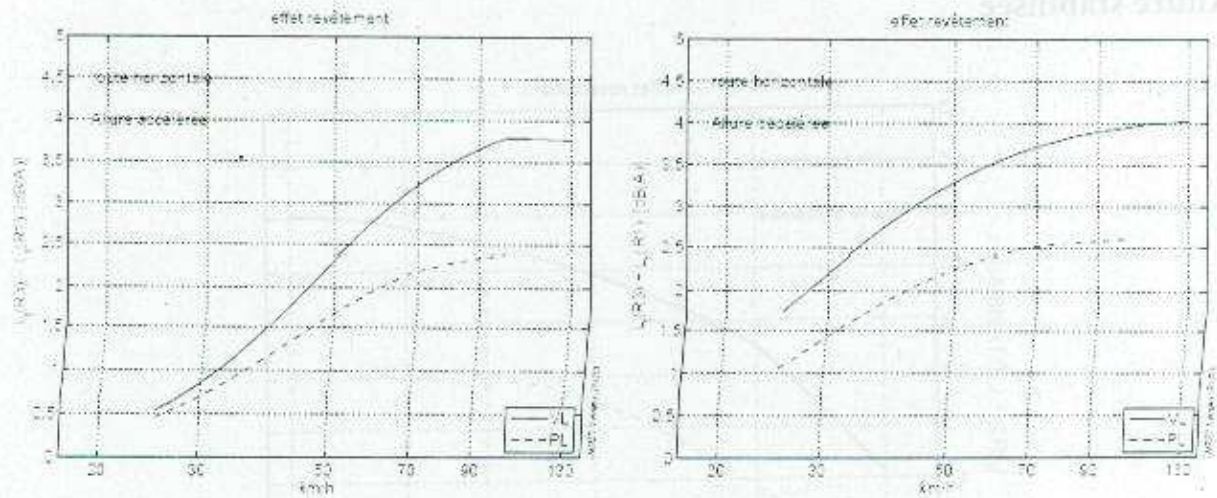


Figure 3.30 - Effet revêtement sur route horizontale pour les allures accélérée (gauche), décélérée (droite)

En allure accélérée sur route horizontale, l'effet revêtement dépasse 2 dB(A) à partir de 45 km/h pour un trafic VL et 60 km/h pour un trafic PL.

En allure décélérée, la vitesse critique descend à 25 km/h pour le trafic VL et 45 km/h pour le trafic PL.

3.8.3 - Effet allure

Allure accélérée / allure stabilisée

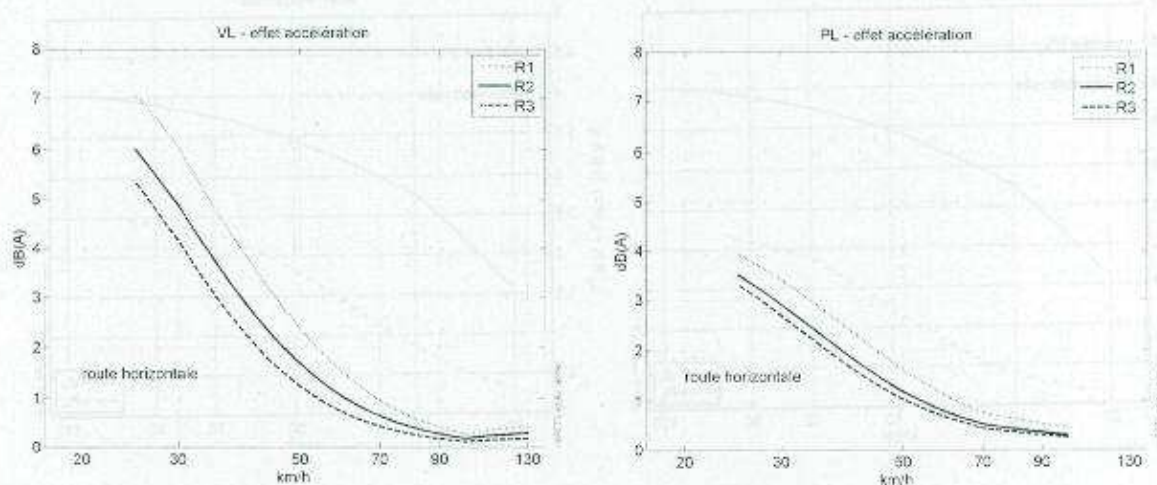


Figure 3.31 - Trafic VL. Différence d'émission entre allure accélérée et allure stabilisée. Gauche : VL, Droite : PL.

Sur route horizontale, les valeurs d'émission sont plus importantes en allure accélérée qu'en allure stabilisée (Figure 3.31). Elles dépendent du revêtement. Pour les VL (graphique de gauche) la différence dépasse 2 dB(A) jusqu'à 45 km/h pour la catégorie R2 et jusqu'à 55 km/h pour la catégorie R1. Pour les PL (graphique de droite) la différence reste supérieure à 2 dB(A) en deçà de 35 km/h pour la catégorie R2 et en deçà de 45 km/h pour la catégorie R1.

Allure décélérée / allure stabilisée

Sur route horizontale, les valeurs d'émission des VL en allure décélérée diffèrent peu de celles en allure stabilisée (Figure 3.32). Les valeurs d'émission des PL en allure décélérée sont les mêmes qu'en allure stabilisée.

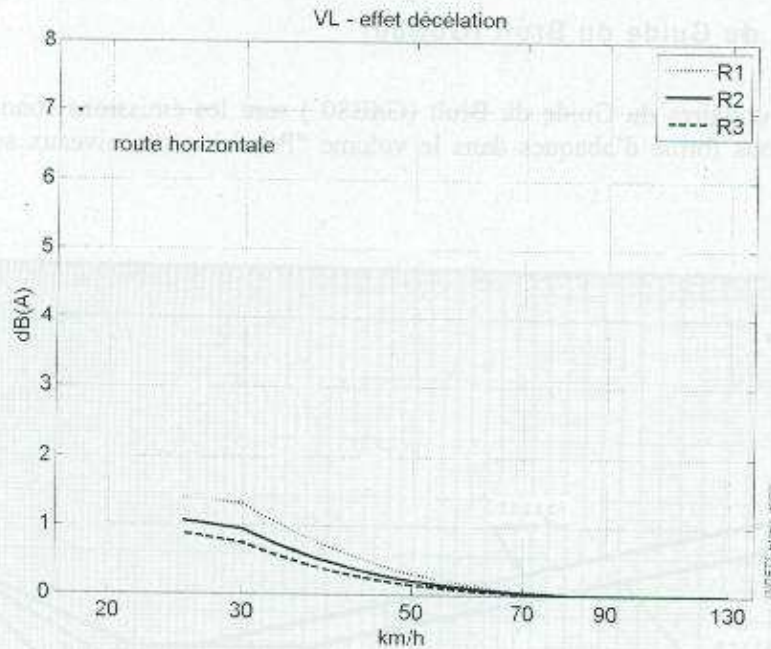


Figure 3.32 - Trafic PL. Différence d'émission entre allure accélérée et allure stabilisée.

3.9 - Comparaison des valeurs d'émission unitaires avec celles du Guide du Bruit (1980) [3]

Par commodité, nous utiliserons le terme "GdB80" pour faire référence au Guide du bruit des transports terrestres [3] qui date de 1980.

3.9.1 - Les données du Guide du Bruit (GdB80)

Les valeurs d'émission unitaires du Guide du Bruit (GdB80) sont les émissions sonores E de la méthode détaillée [3], fournies sous forme d'abaques dans le volume "Prévision des niveaux sonores" et reproduites Figure 3.33.

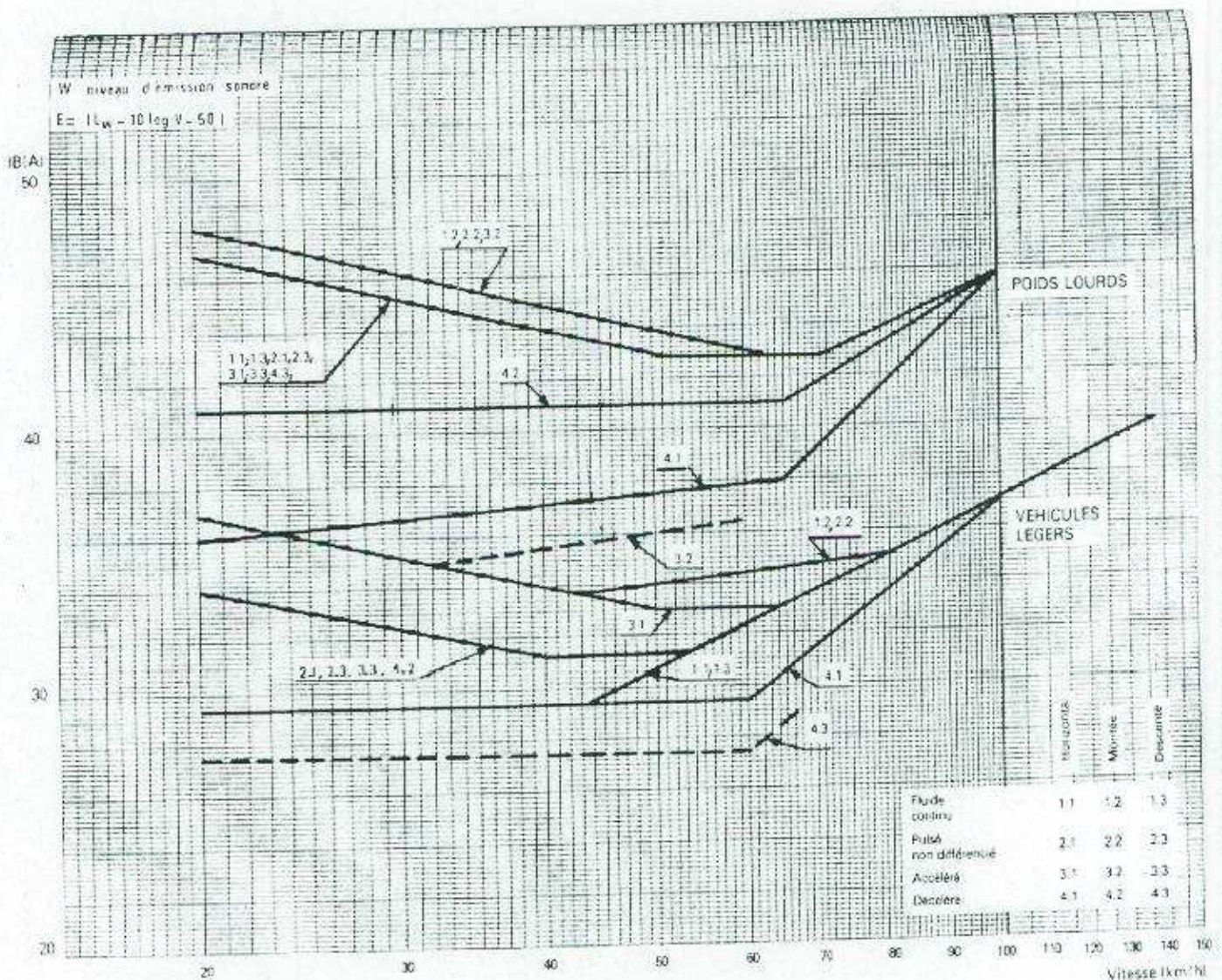


Figure 3.33 - Emissions unitaires des véhicules [d'après [3]]

L'émission sonore E d'un véhicule est définie, par convention, par la relation :

$$E = L_w - 10 \log V - 50 \quad \text{dB(A)} \quad (49)$$

Elle est égale numériquement au $L_{eq,1h}$ provoqué par un véhicule de puissance acoustique L_w , circulant à la vitesse V km/h sur une voie rectiligne distante de 50 m du point de mesure²³.

L'émission sonore E est donnée, en fonction de la vitesse, pour 2 catégories de véhicules (VL : moins de 3,5 t, PL : 3,5 t ou plus) et 12 configurations caractérisées par le type d'écoulement et le type de profil en long.

Certaines configurations sont considérées comme équivalentes i.e. comme produisant le même bruit. Les équivalences ne sont pas les mêmes pour les VL et pour les PL. Elles sont résumées Tableau 3.34. Toutes les configurations repérées par le même symbole ont même niveau d'émission. Le bruit des VL est ainsi défini par 7 abaques d'émission sonore, celui des PL par 4.

GdB80 E VL	profil horizontal	montée	descente
fluide continu	0	×	0
pulsé non différencié	+	×	+
pulsé accéléré	a	b	+
pulsé décéléré	c	+	d

GdB80 E PL	profil horizontal	montée	descente
fluide continu	A	B	A
pulsé non différencié	A	B	A
pulsé accéléré	A	B	A
pulsé décéléré	C	D	A

Tableau 3.34 - GdB80, grille d'équivalence des émissions unitaires : les configurations qui ont un même symbole ont même niveau d'émission sonore E .

3.9.2 - Les nouvelles valeurs unitaires

L'option retenue pour les nouvelles valeurs est de caractériser l'émission sonore par la puissance acoustique d'une "ligne source", quantité mieux appropriée pour les logiciels de prévision de bruit de trafic. Elle est donnée par unité de longueur. Son niveau, pour un débit de 1 véhicule/heure est :

$$L_{w/m/veh} = L_w - 10 \log V - 30 \quad (50)$$

L'émission sonore est, ici aussi, donnée en fonction de la vitesse pour les 2 mêmes catégories de véhicules, mais en considérant seulement 9 configurations allure/profil en long (Tableau 3.35).

$L_{w/m}$ VL	profil horizontal	montée	descente
allure stabilisée	s	s	s
allure accélérée	a	a	a
allure décélérée	d	d	d

$L_{w/m}$ PL	profil horizontal	montée	descente
allure stabilisée	S	B	C
allure accélérée	A	E	A
allure décélérée	S	S	C

Tableau 3.35 - Nouveau guide, grille d'équivalence des émissions unitaires : les configurations qui ont un même symbole ont même niveau d'émission sonore $L_{w/m}$.

Les valeurs d'émission obtenues pour les VL s'avèrent ne dépendre que de l'allure, pas de la déclivité. Celles obtenues pour les PL dépendent en général de l'allure et de la déclivité²⁴.

²³ Sur site dégagé (pas d'écran ni de bâtiment à proximité), et avec sol réfléchissant.

²⁴ Les nouvelles valeurs ne sont établies que pour des déclivités ne dépassant pas 6%.

3.9.3 - Comparaison

La correspondance de $L_{W,m}$ avec E est :

$$L_{W,m} = E + 20 \quad (51)$$

Allures

Le GdB80 considère des écoulements fluide continu, pulsé accéléré, pulsé décéléré. Le nouveau guide considère les allures stabilisée, accélérée, décélérée. Les comparaisons se feront entre fluide continu/ allure stabilisée, pulsé accéléré/ allure accélérée, pulsé décéléré/ allure décélérée.

L'écoulement pulsé non différencié considéré dans le GdB80 s'oppose à l'écoulement fluide. Il n'est stable ni dans le temps (variation brusque de débits sur de courtes périodes de temps), ni dans l'espace (concentration irrégulière des véhicules sur la section étudiée, à un instant donné). La nouvelle procédure subdivise une ligne source en tronçons acoustiquement homogènes (débit, vitesse, allure) et ne fournit donc pas de valeur d'émission pour ce type d'écoulement.

Déclivité

Pour le GdB80 comme pour le nouveau guide, les déclivités inférieures à 2% sont considérées ne pas avoir d'influence sur l'émission acoustique d'un véhicule.

Le GdB80 considère qu'en montée ou en descente les niveaux d'émission sont indépendants de la déclivité²⁵. Le nouveau guide arrive à la même conclusion pour les VL²⁶ ; par contre, pour certaines configurations, les valeurs d'émission des PL dépendent de la déclivité. Les évaluations du nouveau guide ne sont données que pour des déclivités ne dépassant pas 6%, les comparaisons avec le GdB80 seront effectuées pour une déclivité de 6%.

Revêtements

L'influence du revêtement (catégorie, âge) n'a pas été prise en compte dans le GdB80. Les comparaisons sont ici effectuées avec les nouvelles valeurs d'émission correspondant à des revêtements jeunes (2 ans ou moins) et non celles des revêtements de 10 ans d'âge.

Organisation

Les comparaisons sont organisées par allure (stabilisée, accélérée, décélérée) et, pour chaque allure, par type de profil en long (route horizontale, montée à 6%, descente à 6%).

Présentation graphique

Les comparaisons sont données dans chaque catégorie/ configuration sous la forme de 2 graphes, avec la vitesse comme variable : l'un (graphe supérieur) où sont tracées les valeurs d'émission du GdB80 et du nouveau guide (pour les catégories R1, R2 et R3) ; l'autre (graphe inférieur) où est tracée la différence ΔL entre la valeur d'émission donnée par le nouveau guide (catégorie R3) et celle donnée par le GdB80. Un ΔL négatif signifie que le bruit de trafic (sur un revêtement de catégorie R3) est aujourd'hui plus faible que dans les années 70. Pour rappeler que l'effet vieillissement n'est pas inclus ici, les catégories sont repérées R1 J, R2 J, R3 J.



²⁵ supérieure à 2%

²⁶ Il est même conclu qu'à allure donnée les valeurs d'émission VL, sur route horizontale, en montée ou en descente, sont les mêmes.

3.9.4 - Allure stabilisée (Figure 3.36)

Allure stabilisée - route horizontale (Figure 3.36 graphiques du haut)

Dès 40 km/h environ, les nouvelles valeurs d'émission des VL pour la catégorie R3 J sont les mêmes que celles du GdB80 : aux moyennes et hautes vitesses, le bruit de trafic VL sur des revêtements de la catégorie R3 est le même aujourd'hui qu'il y a 25 ans²⁷. En deçà de 40 km/h les nouvelles valeurs d'émission sont plus faibles. Ceci peut s'interpréter comme résultant d'une réduction de la composante bruit moteur du parc entre les années 80 et aujourd'hui. La réduction sur le bruit de trafic est d'environ 3 dB(A) à 25 km/h.

Les nouvelles valeurs d'émission des PL sur R3 J ne sont identiques à celles du GdB80 qu'au delà de 70 km/h. A 25 km/h, le bruit de trafic PL donné par le nouveau guide (R3 J) est inférieur de 9 dB(A) à celui donné par le GdB80.

Allure stabilisée - montée (Figure 3.36 graphiques du milieu)

Anciennes et nouvelles valeurs (R3 J) d'émission en montée se confondent à partir de 80 km/h pour les VL et 60 km/h pour les PL (déclivité 6%). Les écarts à 25 km/h entre nouvelles valeurs et GdB80 sont, pour les VL, plus importants ($\Delta L = -10$ dB(A)) et, pour les PL, moins importants ($\Delta L = -4$ dB(A)) que ce qui est observé sur route horizontale.

Allure stabilisée - descente (Figure 3.36 graphiques du bas)

Pour les VL, mêmes résultats et mêmes commentaires que allure stabilisée/ route horizontale.

Selon le GdB80 les PL roulant à allure stabilisée font le même bruit en descente que sur route horizontale. Selon les nouvelles estimations une déclivité au delà de -2% augmente l'émission acoustique des PL.

L'émission des PL donnée par le nouveau guide sur R3 J est inférieure à l'émission donnée par le GdB80 en deçà de 70 km/h environ. L'écart atteint -6 dB(A) à 25 km/h. Au delà de 70 km/h les niveaux sont pratiquement les mêmes.

²⁷Cf. supra §3

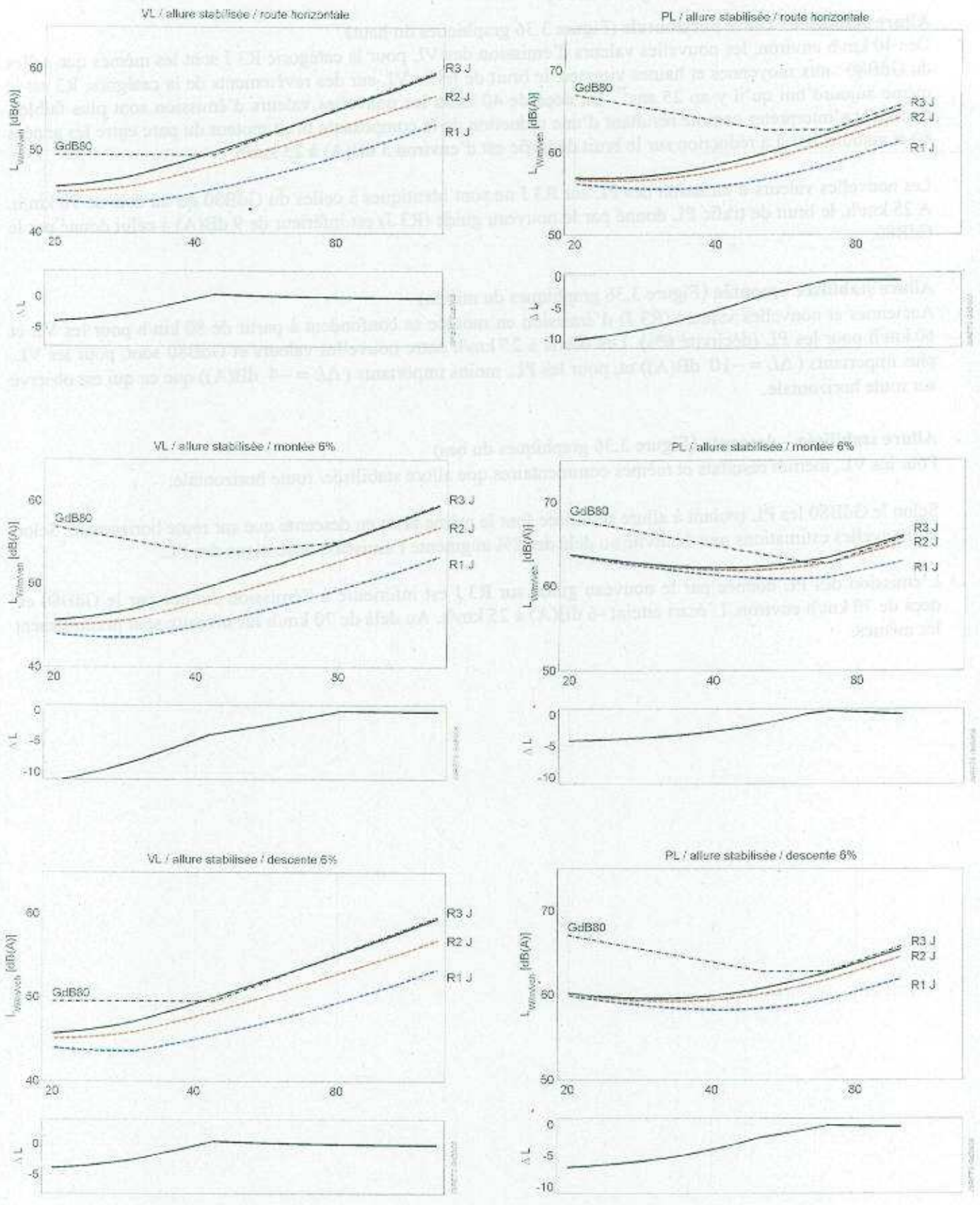


Figure 3.36 - Allure stabilisée. Emissions GdB80 et nouvelles valeurs (sans effet vieillissement). Gauche : VL. Droite : PL. Haut : route horizontale. Milieu : Montée (6% pour le nouveau guide). Bas : descente (6% pour le nouveau guide)

3.9.5 - Allure accélérée (Figure 3.37)

Allure accélérée - route horizontale (Figure 3.37 graphiques du haut)

En allure accélérée les émissions VL sur la catégorie R3 J sont pratiquement égales à celles du GdB80 au delà de 55 km/h. L'écart aux très basses vitesses est du même ordre que celui observé à allure stabilisée.

Pour les PL, les différences aux basses vitesses sont plus faibles que celles observées à allure stabilisée (à 25 km/h, $\Delta L = -6$ dB(A) à allure accélérée contre $\Delta L = -9$ dB(A) à allure stabilisée). Nouvelles valeurs sur R3 J et valeurs GdB80 se confondent à partir de 70 km/h.

Allure accélérée - montée (Figure 3.37 graphiques du milieu)

Les valeurs d'émission des VL en montée/ allure accélérée ne sont données dans le GdB80 que pour des vitesses inférieures à 60 km/h. Elles sont supérieures de 3 dB(A) à 4 dB(A) aux nouvelles valeurs (R3 J).

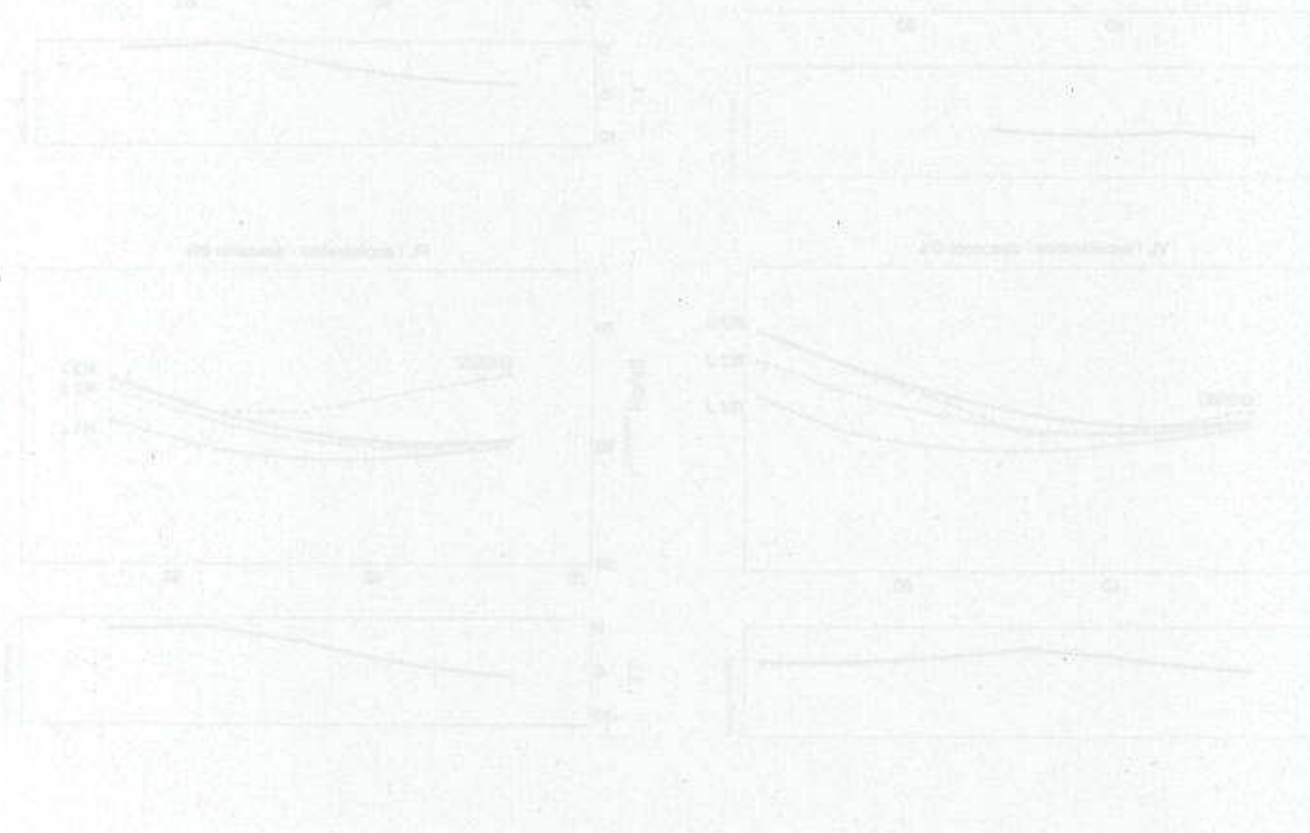
L'émission des PL en montée est, pour le GdB80 comme pour les nouvelles valeurs (rampe $\leq 6\%$), la même à allure accélérée qu'à allure stabilisée. Anciennes et nouvelles valeurs se confondent à partir de 60 km/h. L'écart entre valeurs à 25 km/h est $\Delta L = -4$ dB(A).

Allure accélérée - descente (Figure 3.37 graphiques du bas)

La configuration allure accélérée/ descente est la seule pour laquelle les nouvelles valeurs d'émission VL s'avèrent très proches de celles du GdB80 sur toute la plage de vitesse²⁸.

Selon le GdB80 et le nouveau guide, un PL roulant à allure accélérée en descente fait le même bruit qu'à allure accélérée sur route horizontale²⁹. Pour les observations cf. donc supra allure accélérée/ route horizontale.

En deçà de 70 km/h environ, l'émission PL donnée par le nouveau guide sur R3 est inférieure à celle donnée par le GdB80. L'écart est environ -5 dB(A) à 25 km/h. Au delà de 70 km/h les niveaux sont pratiquement les mêmes.



²⁸ Les valeurs d'émission VL sont considérées être indépendantes de la déclivité, pour le GdB80 comme pour le nouveau guide. Les valeurs du nouveau guide ne sont établies que pour des déclivités ne dépassant pas 6%.

²⁹ Les valeurs d'émission PL à allure accélérée/ descente sont indépendantes de la déclivité, pour le nouveau guide comme pour le GdB80. Les valeurs du nouveau guide ne sont établies que pour des déclivités ne dépassant pas 6%.

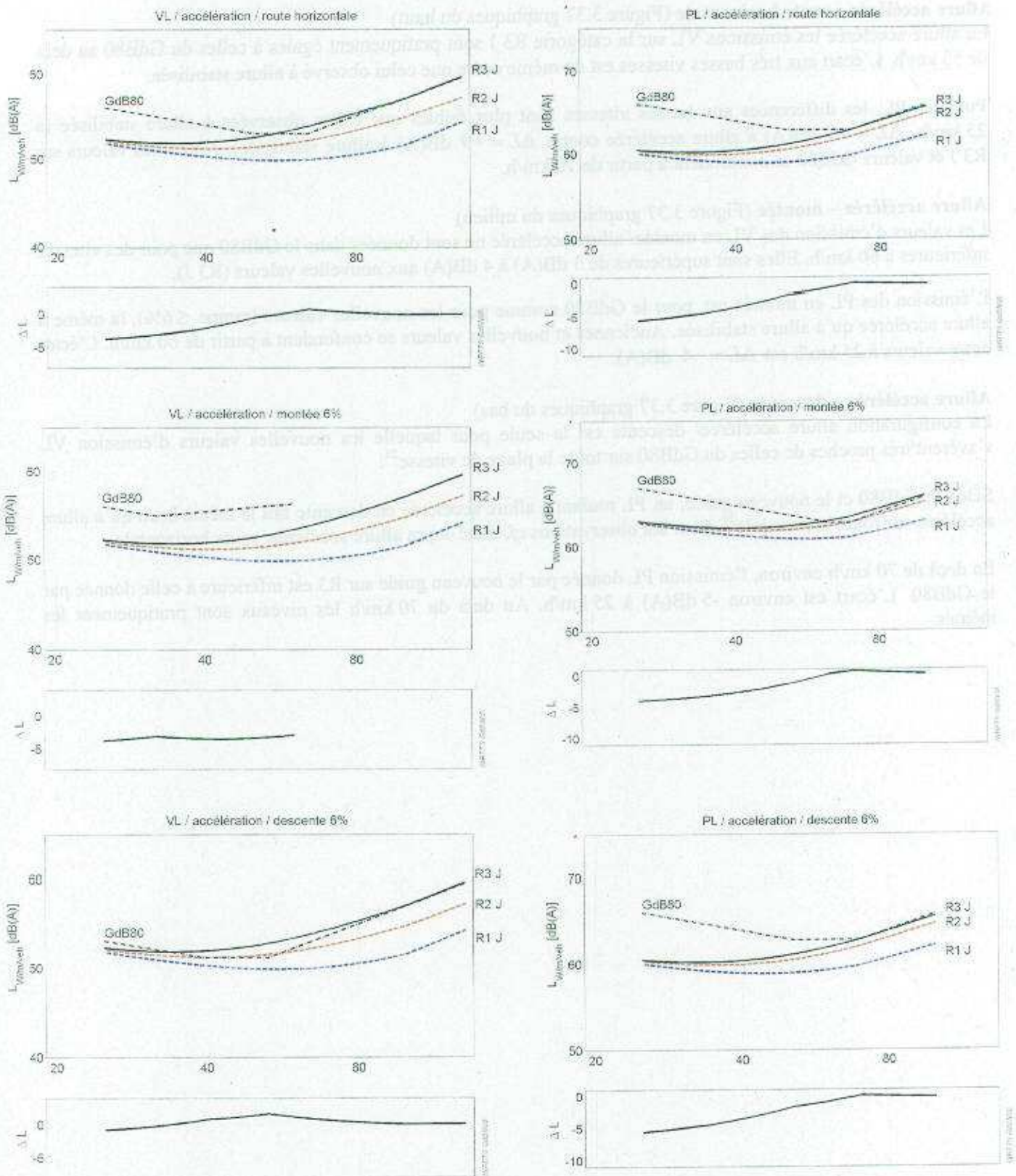


Figure 3.37 - Allure accélérée. Emissions GdB80 et nouvelles valeurs (sans effet vieillissement). Gauche : VL. Droite : PL. Haut : route horizontale. Milieu : Montée (6% pour le nouveau guide). Bas : descente (6% pour le nouveau guide)

3.9.6 - Allure décélérée (Figure 3.38)

Allure décélérée - route horizontale (Figure 3.38 graphiques du haut)

Contrairement à ce qui est observé dans la plupart des autres cas, les nouvelles valeurs d'émission sur R3 J s'avèrent dans certaines plages de vitesse supérieures à celles données par le GdB80 (entre 40 km/h et 100 km/h pour les VL, en deçà de 95 km/h pour les PL).

La démarche utilisée pour construire les nouvelles valeurs considère que la décélération est obtenue, par certains en utilisant le frein à pied, par d'autres en utilisant le frein moteur. En conséquence, la composante moteur et l'émission globale sont plus importantes à allure décélérée qu'à allure stabilisée.

Les valeurs d'émission GdB80 à allure stabilisée et à allure décélérée sont tracées sur un même graphique Figure 3.39. Selon le GdB80 un VL en décélération émet plutôt moins de bruit qu'à allure stabilisée (graphe de gauche), un PL en décélération émet beaucoup moins de bruit qu'à allure stabilisée (graphe de droite).

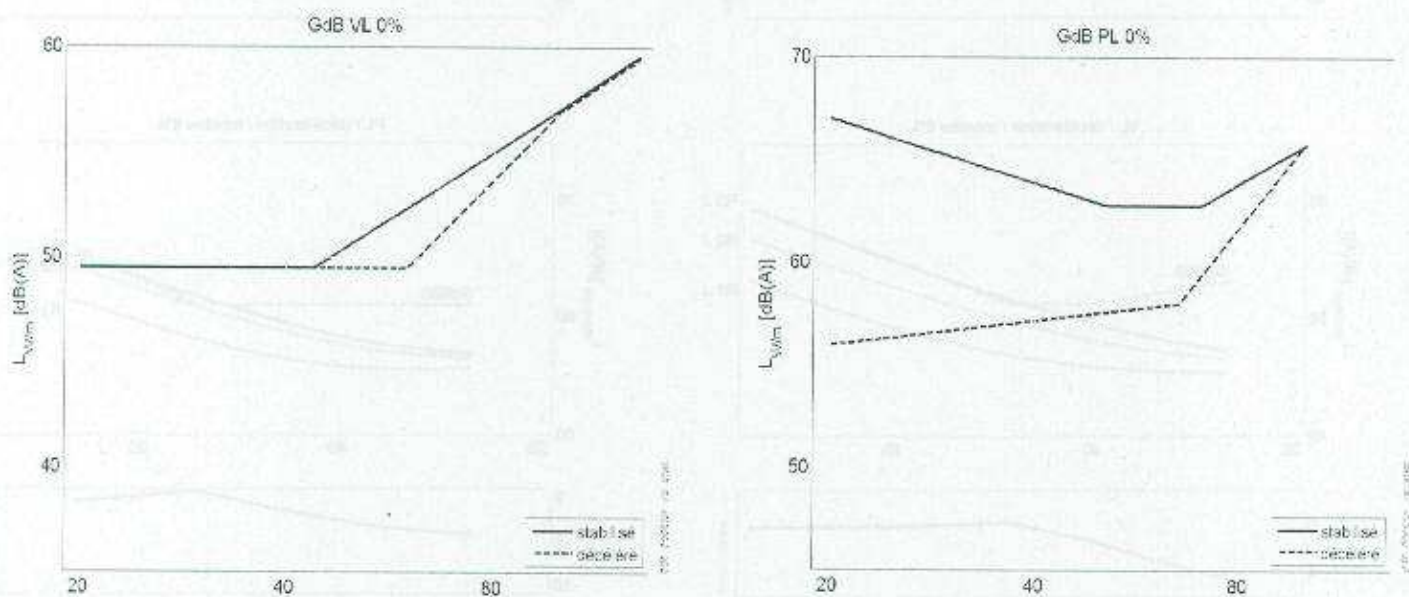


Figure 3.39 - GdB80 Route horizontale. Allures stabilisée et décélérée. Gauche : VL. Droite : PL

Allure décélérée – montée (Figure 3.38 graphiques du milieu)

GdB80 et nouveau guide donnent, à partir de 50 km/h, mêmes valeurs d'émission pour les VL en montée/ allure décélérée. A 25 km/h l'écart entre valeurs atteint -6 dB(A).

Selon le GdB80 le PL à allure décélérée fait plus de bruit en montée que sur route horizontale. Selon les nouvelles estimations, le PL à allure décélérée fait le même bruit en montée que sur route horizontale. Les nouvelles valeurs (R3 J) s'avèrent pratiquement égales à celles du GdB80 au delà de 60 km/h. L'écart à 25 km/h est de l'ordre de -4 dB(A).

Allure décélérée – descente (Figure 3.38 graphiques du bas)

Les valeurs d'émission VL données par le GdB80 pour la configuration descente/ allure décélérée sont les plus basses de toutes. Sauf aux très faibles vitesses elles s'avèrent inférieures aux nouvelles valeurs (R3 J).

Pour le GdB80 comme pour le nouveau guide, les valeurs d'émission PL en descente de 6% à allure décélérée sont les mêmes qu'à allure stabilisée.

L'émission des PL donnée par le nouveau guide sur R3 J est inférieure à l'émission donnée par le GdB80 en deçà de 70 km/h environ. L'écart atteint -6 dB(A) à 25 km/h. Au delà de 70 km/h les niveaux sont pratiquement les mêmes.

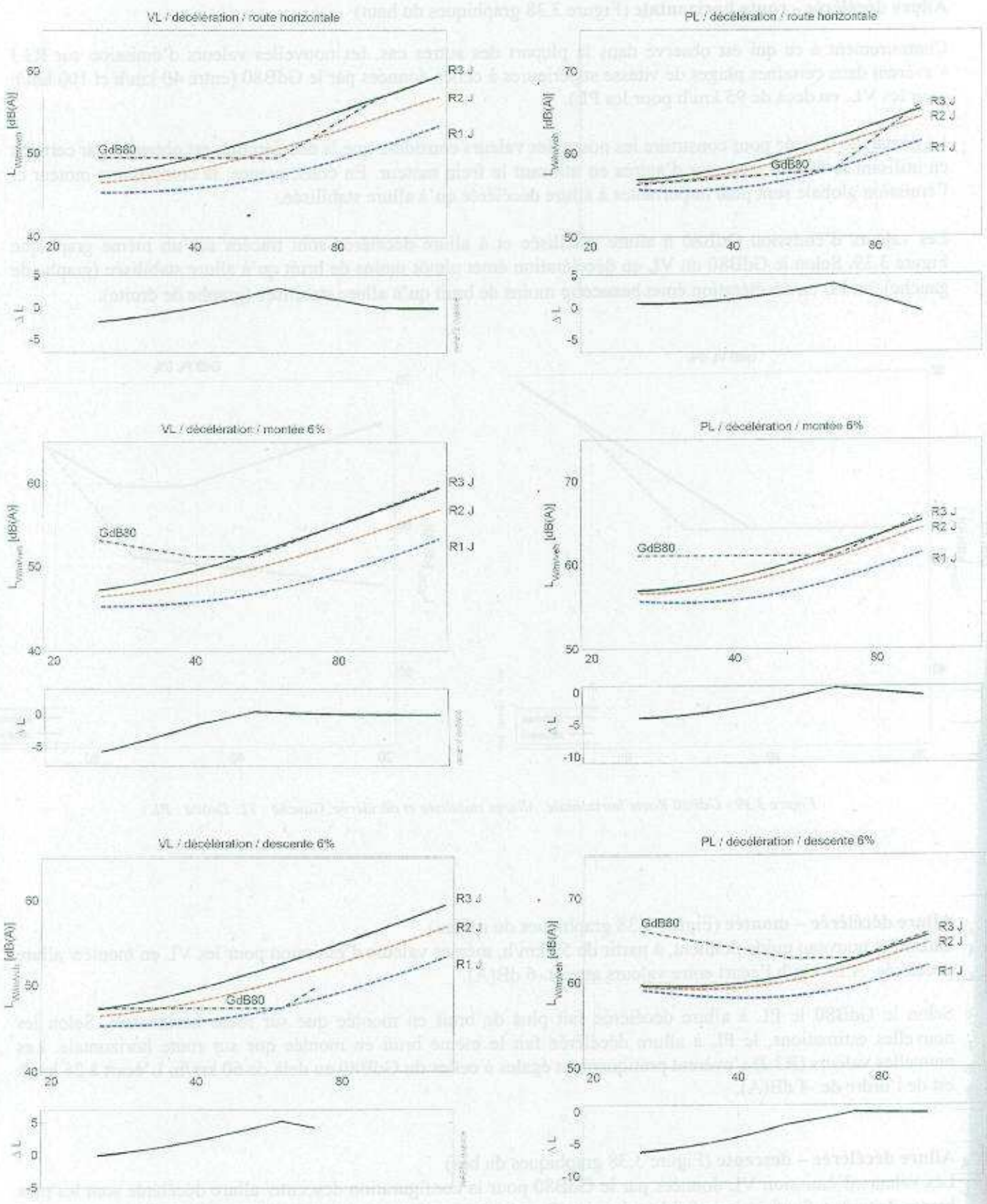


Figure 3.38 - Allure stabilisée. Emissions GdB80 et nouvelles valeurs (sans effet vieillissement). Gauche : VL. Droite : PL. Haut : route horizontale. Milieu : Montée (6% pour le nouveau guide). Bas : descente (6% pour le nouveau guide)

3.9.7 - Conclusion

Mis à part le cas de 3 allures/configurations, les valeurs d'émission du nouveau guide sur la catégorie R3 (sans effet de vieillissement) se confondent pratiquement avec celles du GdB80 aux hautes vitesses, domaine où le bruit de roulement prédomine. Il apparaît donc que le bruit de roulement sur les revêtements de la catégorie R3 correspond au bruit de roulement sur les revêtements des années 70, pour les VL comme pour les PL. Ce n'est pas trop surprenant dans la mesure où les techniques de revêtement utilisées dans les années 70 sont, pour leur grande majorité, classées dans la catégorie R3. Ceci implique cependant que les caractéristiques acoustiques des pneumatiques ont peu changé depuis les années 70 (cette stabilité acoustique des pneumatiques a été constatée par Sandberg pour la période 1920-1980 [32]).

Aux basses vitesses les nouvelles valeurs d'émission sont en général inférieures à celles du GdB80. Ceci peut s'interpréter comme résultant d'une réduction de la composante moteur du parc entre les années 80 et aujourd'hui. Les réductions de bruit observées à 25 km/h sont de l'ordre de 3 B(A) pour les VL et de l'ordre de 5 dB(A) pour les PL.

3.9.8 - Quelques valeurs caractéristiques

Vitesses critiques

La vitesse à partir de laquelle les valeurs d'émission du nouveau guide sur R3 restent pratiquement égales à celles du GdB80 dépend de la catégorie du véhicule et de la configuration (Tableau 3.40).

VL	profil horizontal	montée	descente	PL	profil horizontal	montée	descente
allure stabilisée	40	80	40	allure stabilisée	70	60	70
allure accélérée	80	x	80	allure accélérée	70	60	70
allure décélérée	x	50	x	allure décélérée	x	60	70

Tableau 3.40 - Vitesses (en km/h) à partir desquelles les valeurs d'émission du GdB80 et du nouveau guide (R3) restent pratiquement égales.

Différences à 25 km/h

Aux basses vitesses les nouvelles valeurs d'émission sont en général inférieures à celles du GdB80. Les différences à la vitesse de 25 km/h sont données Tableau 3.41.

VL	profil horizontal	montée	descente	PL	profil horizontal	montée	descente
allure stabilisée	-3	-10	-3	allure stabilisée	-9	-4	-6
allure accélérée	-3	-4	-3	allure accélérée	-6	-4	-5
allure décélérée	x	-6	x	allure décélérée	x	-4	-6

Tableau 3.41 - Différences en dB(A) entre les valeurs nouveau guide (R3) et les valeurs GdB80 à 25 km/h.

3.9.9 - L'équivalent Poids Lourd

L'équivalent poids lourd est une notion introduite dans la méthode simplifiée du GdB80 pour simplifier les calculs. Il permet d'évaluer le bruit de trafic à partir d'une seule équation où figure une seule vitesse, celle des VL. L'expression est de la forme³⁰ :

$$Leq = 10 \log(Q_{VL} + E_{qPL} \times Q_{PL}) + 20 \log V + \dots \quad (52)$$

³⁰le facteur d'équivalence acoustique et le niveau d'émission sonore sont désignés par le même symbole E dans le GdB80. Nous proposons d'utiliser E_{qPL} ici pour éviter toute confusion.

Q_{VL} : débit représentatifs des VL,

Q_{PL} : débit représentatif des PL,

E_{qPL} : facteur d'équivalence acoustique entre PL et VL

V vitesse du trafic.

L'équivalence est aussi exprimée par la relation

$$1PL = E_{qPL} \times VL \quad (53)$$

E_{qPL} prend en compte le fait que la vitesse de circulation des PL peut être différente de celle des VL. Les valeurs proposées dans le GdB80 sont reportées dans le Tableau 3.42 :

	2%	3%	4%	5%	≥6%
Autoroute	4	5	5	6	6
VRU	7	9	10	11	12
Voie urbaine	10	13	16	18	20

Tableau 3.42 - Facteur d'équivalence E_{qPL} acoustique entre PL et VL : $1PL = E_{qPL} \times VL$

(GdB80 méthode simplifiée)

Nouvelles valeurs

Sauf à retrouver les correspondances de vitesse entre PL et VL utilisées dans le GdB80 pour les différents types de voies, il est impossible de donner, pour les nouvelles valeurs, une équivalence PL qui puisse être comparée à celle de la méthode simplifiée.

Il est proposé de considérer un facteur d'équivalence E_{qPL} avec comme hypothèse sur les vitesses

$V \leq 100$ km/h : VL et PL roulent à la même vitesse,

$V > 100$ km/h : les PL roulent à 100 km/h.

Les niveaux d'émission pris ici pour le nouveau guide sont ceux correspondant à un revêtement âgé.

Les valeurs E_{qPL} correspondant aux nouvelles valeurs d'émission sont tracées Figures 3.43 (vitesse stabilisée route horizontale), 3.44 (vitesse stabilisée, montée de 6% et descente de 6%) et 3.45 (accélération et décélération sur route horizontale) pour les 3 catégories de revêtements. Les valeurs du GdB80 sont ré-évaluées à partir des abaques de la Figure 1 du GdB80.

D'une façon générale le facteur d'équivalence est fonction de la vitesse. Pour les nouvelles valeurs et aux vitesses supérieures à 100 km/h, il diminue lorsque la vitesse augmente : le bruit des VL augmente avec la vitesse alors que les PL continuent à rouler à la vitesse de 100 km/h. Les facteurs d'équivalence sur R1 et R2 sont proches, et supérieurs au facteur d'équivalence sur R3.

Vitesse stabilisée, route horizontale

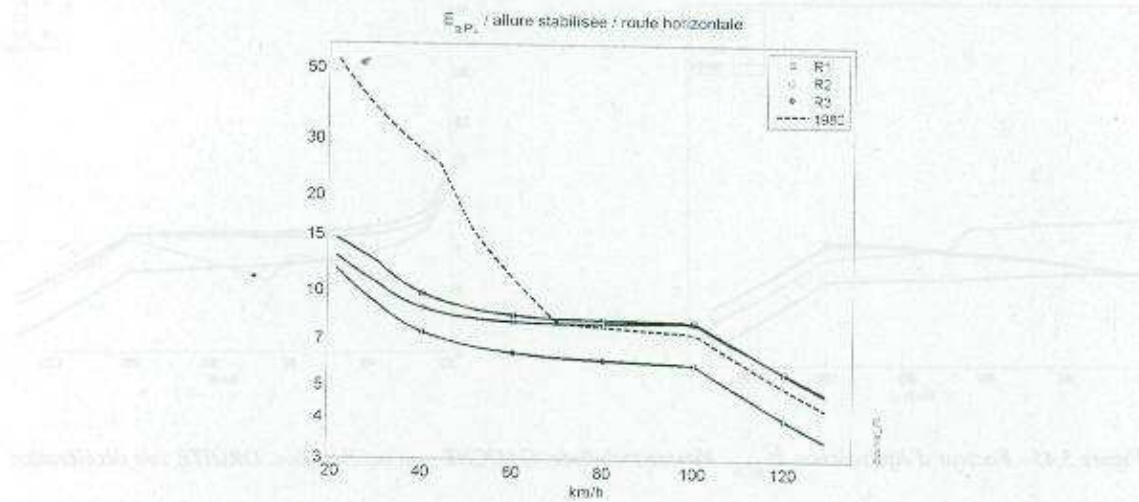


Figure 3.43 - Facteur d'équivalence E_{qPL} . Vitesse stabilisée - route horizontale.

Les facteurs d'équivalence sur R1 et R2 sont de l'ordre de 8 entre 60 km/h et 100 km/h. Celui de R3 est de l'ordre de 6 sur la même plage de vitesse. Pour les trois catégories, le facteur d'équivalence croît significativement aux faibles vitesses.

Au delà de 65 km/h le facteur d'équivalence du GdB80 est plutôt proche de celui sur R1 et R2.

Montée ou descente à vitesse stabilisée

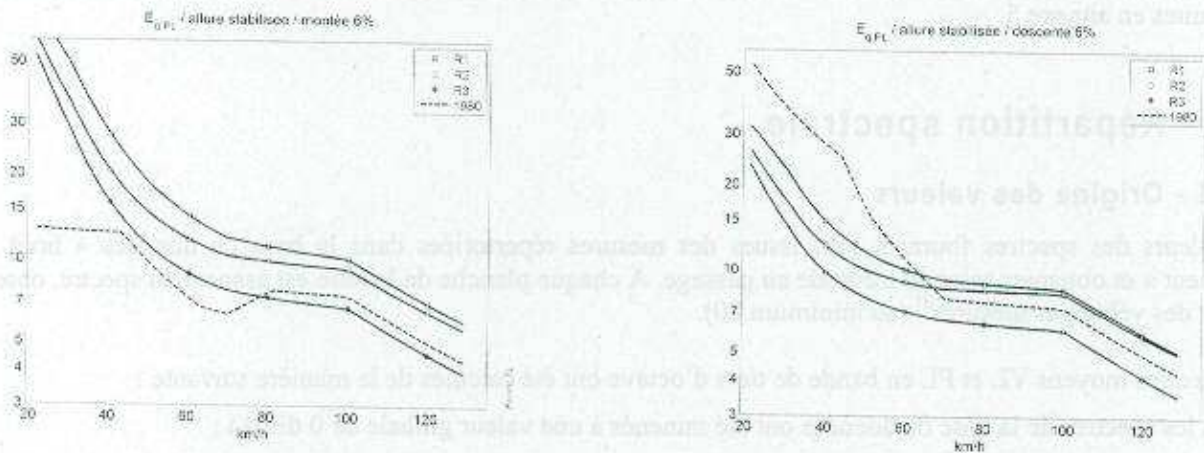


Figure 3.44 - Facteur d'équivalence E_{qPL} . Vitesse stabilisée - GAUCHE : montée. DROITE : descente.

Entre 60 km/h et 100 km/h à vitesse stabilisée, le facteur d'équivalence sur R1 et R2 est de l'ordre de 10 à 15 en montée, de l'ordre de 9 en descente. Sur R3 où le bruit de roulement est plus important, le facteur d'équivalence est plus faible (6 à 8 environ). Les équivalences données par le GdB80 ont des ordres de grandeur comparables.

Accélération ou décélération sur route horizontale

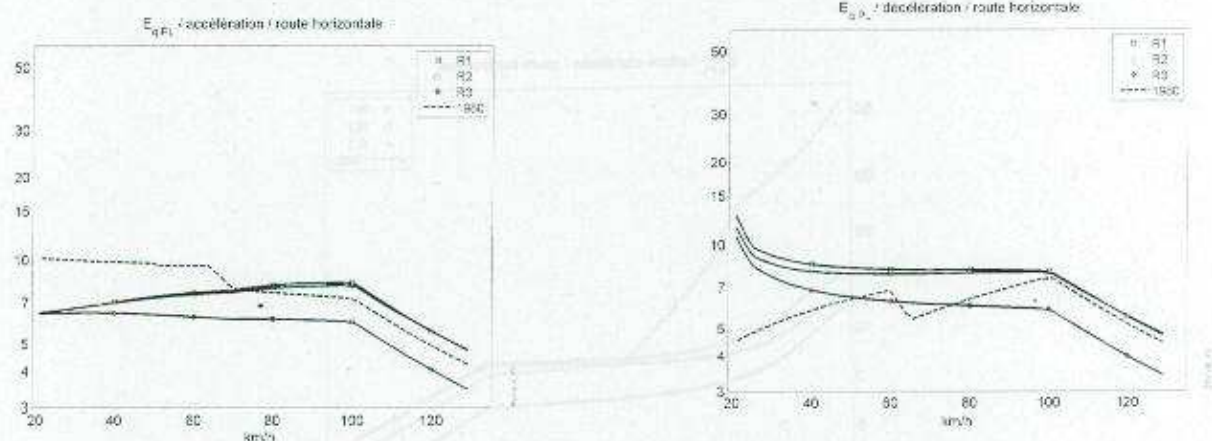


Figure 3.45 - Facteur d'équivalence $E_{g,PL}$. Vitesse stabilisée. GAUCHE : en accélération. DROITE : en décélération.

En accélération ou décélération sur route horizontale, les PL sont considérés faire environ 7 fois plus de bruit que les VL, sauf aux très hautes vitesses pour les deux cas et aux très basses vitesses pour la décélération.

Le GdB80 donne des équivalences comparables, sauf aux faibles vitesses.

3.9.10 – Eléments particuliers

Les données relatives aux tranchées, tunnels et couvertures n'ont pas été traitées et réactualisées dans ce guide. Les formules données dans le Guide du Bruit (GdB80) restent donc inchangées. Pour information, elles sont reproduites en annexe 5.

3.10 - Répartition spectrale

3.10.1 - Origine des valeurs

Les valeurs des spectres fournies sont issues des mesures répertoriées dans la base de données « bruit de roulement » et obtenues selon la méthode au passage. A chaque planche de la base est associé un spectre, obtenu à partir des véhicules mesurés³¹ (au minimum 80).

Des spectres moyens VL et PL en bande de tiers d'octave ont été calculés de la manière suivante :

- tous les spectres de la base de données ont été ramenés à une valeur globale de 0 dB(A) ;
- par technique de revêtement et par type de véhicule (VL et PL), la moyenne arithmétique par tiers d'octave de tous les spectres a été calculée. Cette moyenne a ensuite été ramenée à une valeur globale de 0 dB(A) ;
- ces spectres moyens par technique ont été classés en 4 familles distinguant les VL et PL d'une part, revêtements drainants et non drainants d'autre part.

En examinant ces spectres moyens obtenus par technique de revêtement, on observe que dans la famille des revêtements non drainants, l'écart type des spectres est de 1 à 2 dB selon les fréquences pour les VL et de 0,5 à 1,5 dB selon les fréquences pour les PL. Pour les revêtements drainants, les données utilisées concernent essentiellement le revêtement BBDr 0/10, la notion d'écart type n'est donc pas appropriée.

³¹ Ce spectre est obtenu en calculant, sur chaque bande de tiers d'octave, la régression linéaire des niveaux L_{Amax} des véhicules en fonction du logarithme de la vitesse. Il est donné pour une certaine valeur de la vitesse, appelée vitesse de référence [voir norme 31 119].

L'examen des représentations graphiques a montré que, à l'intérieur de chacune des quatre familles, les spectres sont de forme similaire. Ils ont donc tous été intégrés dans le calcul des spectres représentatifs de chaque famille, soit :

- 150 spectres VL et 80 spectres PL pour les revêtements non drainants,
- 30 spectres VL et 20 spectres PL pour les revêtements drainants.

Les spectres représentatifs de chaque famille ont été calculés en effectuant la moyenne arithmétique par tiers d'octave des spectres de chaque technique. Cette moyenne a ensuite été ramenée à une valeur globale de 0 dB(A).

Remarque : Les revêtements BBTM de type 2 ne peuvent pas être classés dans la même famille de revêtements que les drainants car les formes diffèrent : leurs spectres présentent un pic vers 1000 Hz, qui est absent dans les spectres des drainants.

3.10.2 - Influence de la vitesse

Cette approche de détermination de spectres d'émission sonore des véhicules ne tient pas compte de l'influence éventuelle de la vitesse sur la forme du spectre (l'hypothèse retenue est que la vitesse modifie le niveau et non la forme du spectre).

Note : les spectres définis ici sont issus de valeurs mesurées au passage à vitesses élevées. On a considéré qu'ils étaient également utilisables dans le domaine de vitesse où le bruit moteur prédomine. En effet, des observations ont montré que les plages de fréquences mises en jeu pour les deux composantes moteur et roulement sont similaires.

3.10.3 - Représentativité des spectres et intérêt de la séparation VL/PL

Les spectres « trafic » composés d'un pourcentage forfaitaire de 85% de VL et 15 % de PL ont été comparés à 15 spectres (dont 4 drainants) mesurés par ailleurs en LAeq (à 7,5 m de la voie et 1,2 m de hauteur pendant une période de 45 minutes). Cette comparaison montre que les spectres forfaitaires (revêtements drainants /non drainants) sont bien dans les fuseaux des valeurs mesurées en moyennes et hautes fréquences, mais qu'ils sont systématiquement en dessous dans les fréquences inférieures à 500Hz. Cependant ces écarts ont peu d'influence sur le niveau global.

Afin d'évaluer l'intérêt de présenter deux spectres différenciés VL et PL, l'influence du pourcentage PL a été étudiée en comparant les spectres de bruit construits avec des proportions de PL extrêmes (0% et 40%). On observe que les spectres "trafic" recomposés avec une proportion variable de PL sont très similaires, exceptés dans la plage 400-630 Hz (soit la bande d'octave 500 Hz) pour laquelle la largeur de l'enveloppe atteint 5 à 6 dB pour les revêtements non drainants et 2 à 3 dB pour les revêtements drainants.

Au vu de ces résultats, la représentation par un spectre d'émission unique combinant les deux types de véhicules a été adoptée pour la prévision du bruit à faible distance de la route, les deux inconvénients mentionnés (faiblesses dans les graves et variabilité selon le pourcentage de PL autour de 500 Hz) ne paraissant pas rédhibitoires du fait du poids relativement faible des fréquences concernées.

3.10.4 - Propagation à grande distance

Pour s'assurer que la contribution de ces fréquences au bruit global reste limitée même à grande distance de la route, des spectres de différentes compositions PL ont été propagés à une distance de 100 m et de 200 m à l'aide d'un modèle théorique, avec une configuration de site simple (route au niveau du terrain naturel, sol plan), pour les deux types de conditions météorologiques favorables et homogènes. Les résultats montrent une faible dispersion des atténuations par rapport à 7,50 m, quels que soient les cas envisagés. Cependant, les résultats obtenus avec 15 % de PL se trouvent plus proches des résultats obtenus pour un trafic comprenant 40 % de PL que de ceux avec 0 %. Un trafic comprenant 10 % de PL a donc été retenu comme valeur intermédiaire (les spectres correspondant, par tiers d'octave, sont donnés au chapitre 2.8).

3.10.5 - Modifications par rapport aux valeurs antérieures

Le spectre de la NMPB 96 [36] est défini en bande d'octaves, il est donc difficile de le comparer directement aux spectres de la présente méthode (donnés en bande de tiers d'octave).

A titre d'information, la figure 3.46 compare les deux spectres de la présente méthode (revêtements drainants et revêtements non drainants) avec le spectre fourni par la norme EN 1793- partie 3 [33] (le spectre de la NMPB 96 est directement issu de ce dernier, par sommation des tiers d'octave).

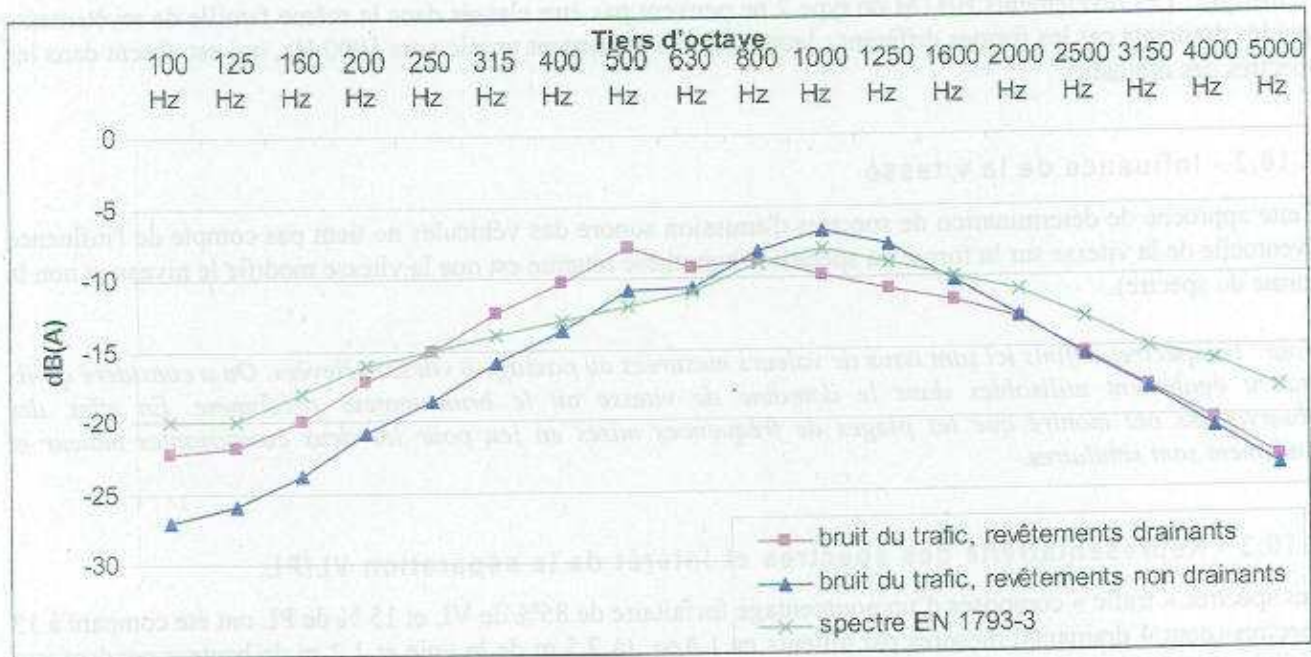


Figure 3.46 - Comparaison spectres définis/spectre de la norme EN 1793- partie 3

Dans les basses et hautes fréquences, les spectres proposés sont inférieurs au spectre de la norme EN 1793 - partie 3, alors que celui-ci se trouve plutôt entre les spectres drainants et non drainants dans les moyennes fréquences (fréquences prépondérantes).

4 – Bibliographie

4.1 – Références bibliographiques

- [1] Décret n° 95-22 du 9 janvier 1995 relatif à la limitation du bruit des aménagements et infrastructures de transports terrestres (JORF du 10/01/1995).
- [2] Arrêté du 5 mai 1995 relatif au bruit des infrastructures routières (JORF du 10/05/1995).
- [3] Guide du Bruit des Transports Terrestres - Prévision des niveaux sonores. CETUR, novembre 1980.
- [4] Directive européenne 2002/49/CE du Parlement européen et du Conseil du 25 juin 2002 relative à l'évaluation et la gestion du bruit dans l'environnement (JOCE du 18 juillet 2002).
- [5] Ordonnance n° 2004-1199 du 12 novembre 2004 (JORF du 14 novembre 2004).
- [6] Loi n° 2005-1319 du 26 octobre 2005 portant diverses dispositions d'adaptation au droit communautaire dans le domaine de l'environnement (JORF du 27 octobre 2005).
- [7] Calcul prévisionnel de bruit routier – Profils journaliers de trafic sur routes et autoroutes interurbaines. Note d'information Economie, Environnement, Conception n°77, Sétra, février 2007, 10 p.
- [8] Structure du trafic sur le réseau routier national – Analyse et évolution. *Dossier thématique*. Sétra, 1999, 30 p.]
- [9] Saturation acoustique sur autoroutes interurbaines. Rapport d'étude, Sétra, mars 2007
- [10] Fonctions temps-débit sur les autoroutes interurbaines – Rénovation des relations entre temps de parcours et débit pour la simulation du trafic – Rapport technique Sétra, novembre 2001 (retirage de juillet 2004)
- [11] La sécurité routière en France : bilan de l'année 2005, La documentation Française, extraits consultables en ligne sur <http://www2.securiteroutiere.gouv.fr/infos-ref/observatoire/l-observatoire/l-observatoire-national-interministeriel-de-securi.html>
- [12] Bruit dû aux moyens de transports – G. Pachiaudi and B. Favre. Note d'information N°15, IRT, 1979.
- [13] Development of national reference energy mean emission levels for the FHWA Traffic Noise Model – G. Gand al. Fleming. Final report, US Department of Transportation – Federal Highway Administration, 1995.
- [14] Vehicle noise emission of tyre/road and motor noise contribution – J. Lelong. In Internoise, Fort Lauderdale, Florida, USA, 1999.
- [15] Bruit des trains routiers – Modélisation simplifiée à partir de mesures sur pistes d'essai – J.F. Hamet and V. Steimer. Technical Report LTE 2025, INRETS, 2000.
- [16] Influence des véhicules sur un bruit de trafic interurbain – Tests de sensibilité PL/TR – J. Lelong. Technical Report MMA 9701, INRETS, 1997.
- [17] Influence des véhicules sur un bruit de trafic urbain – Tests de sensibilité PL/TR – J. Lelong. Technical Report MMA 9703, INRETS, 1997.
- [18] Acoustique – Méthode de mesurage de l'influence des revêtements de chaussées sur le bruit émis par la circulation – Partie 1 : Méthode statistique au passage. Norme ISO-11819-1, septembre 1997.
- [19] NF S 31-119 – Acoustique : Caractérisation in situ des qualités acoustiques des revêtements de chaussées – Mesurages acoustiques au passage, Norme AFNOR, octobre 1993.
- [20] NF S 31 119-2 – Acoustique : Caractérisation in situ des qualités acoustiques des revêtements de chaussée – Mesurages acoustiques au passage – Procédure "Véhicules Maîtrisés", Norme AFNOR, décembre 2000.
- [21] Emissions acoustiques des véhicules routiers – Campagnes de mesures 1997 – R. Michelet and J. Lelong. Technical Report MMA 9802b, INRETS, 1998.

- [22] Emissions acoustiques des véhicules routiers – Campagnes de mesures 1998 – R. Michelet and J. Lelong, Technical Report LTE 9922, INRETS, 1999.
- [23] Véhicules légers – Emission acoustique aux différentes allures urbaines et interurbaines – J. Lelong, Technical Report LTE 2024, INRETS, 2000.
- [24] Etude expérimentale sur les utilisations réelles des véhicules (EUREV) – M. and al. André, Technical Report N°48, INRETS, 1987.
- [25] Bruit des trains routiers – Estimation du bruit moteur en conduite régime adapté – J.F. Hamet, Technical Report LTE 0413, INRETS, 2004.
- [26] Acoustic emission of a passenger car – Effect of road gradient – J.F. Hamet and J. Lelong, Technical Report SILVIA-INRETS-015-WP5, 2005.
- [27] Mesure de bruit au passage – Méthode VM sur RN et sur piste – effet acoustique d'une rampe et de l'accélération sur l'émission sonore d'un VL – H. Lefevre, Technical report, LR Clermont-Ferrand, 2004.
- [28] Mesure de bruit de VL en rampe à faible vitesse – Circuit de Charade – H. Lefevre, Technical report, LR Clermont-Ferrand, 2004.
- [29] Bruit des véhicules légers en rampe – Analyse des résultats obtenus sur le site de Charade – J.F. Hamet and J. Lelong, Technical Report LTE 0437, INRETS, 2004.
- [30] Bruit des véhicules légers en rampe – Analyse des résultats obtenus sur le site d'Orcines la Baraque – J.F. Hamet and J. Lelong, Technical Report LTE 0617, INRETS, 2006.
- [31] Effect of acceleration on vehicle noise emission – J. Lelong and R. Michelet, in Forum Acusticum, Berlin, 1999.
- [32] Six decades of vehicle noise abatement – but what happened to the tires ? – U. Sandberg, Technical Report 100, VTI, 1984.
- [33] NF EN 1793-3 (indice de classement : S 31-303), "Dispositifs de réduction du bruit du trafic routier – Méthode d'essai pour la détermination de la performance acoustique – Partie 3 : Spectre sonore normalisé de la circulation". AFNOR, novembre 1997.
- [34] Influence de la couche de roulement de la chaussée sur le bruit du trafic routier – Note Cfr – info n°4, juin 2001.
- [35] Hamet JF., Besnard F., Lelong J. Nouvelles valeurs d'émission sonore des véhicules routiers. Le tronçon acoustiquement homogène. Rapport INRETS/LTE 0721 Novembre 2007.
- [36] Bruit des infrastructures routières, Méthode de calcul incluant les effets météorologiques – Version expérimentale – NMPB-Routes-96, CERTU, CSTB, LCPC, SETRA, Janvier 1997.

4.2 – Documents bibliographiques du Sétra

- Guide du Bruit des Transports Terrestres – Préviation des niveaux sonores. CETUR, novembre 1980.
- Bruit des infrastructures routières – Méthode incluant les effets météorologiques – version expérimentale – NMPB-Routes-96, CERTU, CSTB, LCPC, SETRA, 1997.
- Bruit et études routières – Manuel du chef de projet. Sétra, CERTU, octobre 2001.
- Calcul prévisionnel de bruit routier – Profils journaliers de trafic sur routes et autoroutes interurbaines. Note d'information Economie, Environnement, Conception n°78, Sétra, février 2007, 10 p.
- Guide méthodologique – Préviation du bruit routier – 2- Méthode de calcul de propagation du bruit incluant les effets météorologiques (NMPB 2008), Sétra 2009.

Annexe 1 – Notations et symboles

dB(A)	le décibel (A), unité dans laquelle est exprimée le niveau sonore, ou niveau de pression, représentatif de l'énergie transmise. Pour tenir compte de la sensation effective de l'oreille humaine, on utilise des courbes de pondération. Pour le bruit routier, ainsi que pour la plupart des bruits dans l'environnement, on utilise la courbe de pondération A
VL	véhicules légers, véhicules dont le PTAC est inférieur à 3,5 tonnes
PL	poids lourds, véhicules dont le PTAC est égal ou supérieur à 3,5 tonnes
L	niveau sonore défini par la relation suivante $L = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2}$
p	moyenne de la pression quadratique ou déclivité du terrain
p ₀	pression de référence, égale au seuil d'audibilité absolue : 2.10 ⁻⁵ Pa
L _{Aeq} (T)	niveau de bruit équivalent, exprimé en décibels A, représentant le niveau de bruit constant qui aurait été produit avec la même énergie que le bruit existant réellement pendant la période T considérée. Il exprime donc la moyenne de l'énergie reçue, la pondération A rendant compte de la sensibilité de l'oreille en fonction de la fréquence à partir d'une courbe de pondération normalisée. La formule de calcul du L _{Aeq} est la suivante : $L_{Aeq}(T) = 10 \cdot \log \left(\frac{1}{T} \int_T \frac{p^2(t)}{p_0^2} \cdot dt \right)$
T	période considérée
V	vitesse des véhicules
V _{réf}	vitesse de référence (90 km/h pour les VL et 80 km/h pour les PL)
V _{min}	vitesse minimale
V _{max}	vitesse maximale
W	puissance acoustique
W ₀	puissance acoustique de référence de valeur W ₀ = 1pW
L _{Amax} "au passage"	niveau sonore maximum observé pendant une période donnée selon les procédures de mesure
L _w	puissance d'émission sonore de formule $L_w = 10 \log \frac{W}{W_0}$
L _{w/m}	puissance d'émission par mètre de voie
L _{w/m} (j)	puissance d'émission sonore par mètre de ligne source et par bande de tiers d'octave

$L_{W/m/v\acute{e}h}$	puissance d'émission par mètre de voie de la catégorie de véhicules pour un débit unitaire (1 véh/h). Elle peut être notée également $L_{W/m}$ (1 véh/h). Pour les VL (respectivement PL), on a donc $L_{W/m/VL}$ (respectivement $L_{W/m/PL}$). Elle se décompose en deux termes $Lr_{W/m}$ et $Lm_{W/m}$ selon la formule suivante : $L_{W/m/v\acute{e}h} = Lr_{W/m} \oplus Lm_{W/m}$
$Lr_{W/m}$	est la composante de $L_{W/m/v\acute{e}h}$ supposée émise par le contact pneumatique-chaussée, dite aussi "composante roulement". Elle peut être notée également $Lroulement$
$Lm_{W/m}$	est la composante de $L_{W/m/v\acute{e}h}$ supposée émise par l'ensemble des sources mécaniques des véhicules, dite aussi "composante moteur". Elle peut être notée également $Lmoteur$
\oplus	représente l'addition énergétique : $L_1 \oplus L_2 = 10 \cdot \log \left[10^{\frac{L_1}{10}} + 10^{\frac{L_2}{10}} \right]$
$\Delta Lr_{W/m}$	erreur commise sur le niveau d'émission de la composante "roulement"
$\Delta Lm_{W/m}$	erreur commise sur le niveau d'émission de la composante "moteur"
Ri	rapport de boîte
TMJA	trafic moyen journalier annuel
%PL	pourcentage de poids lourds. C'est la part des PL dans le trafic total
%PL jour	pourcentages de poids lourds sur la période de jour
%PL nuit	pourcentages de poids lourds sur la période de nuit
%TV jour	pourcentages du débit tous véhicules sur la période de jour
%TV nuit	pourcentages du débit tous véhicules sur la période de nuit
Q_{veh}	débit moyen horaire de la catégorie de véhicules
Q_{VL}	débit moyen horaire pour les VL
Q_{PL}	débit moyen horaire pour les PL
Q_{TV}	débit moyen horaire tous les véhicules VL et PL
$Q_{VL,jour}$	débit moyen horaire par VL pour la période de jour
$Q_{VL,nuit}$	débit moyen horaire par VL pour la période de nuit
$Q_{PL,jour}$	débit moyen horaire par PL pour la période de jour
$Q_{PL,nuit}$	débit moyen horaire par PL pour la période de nuit
$Q_{TV,eq}$	débit équivalent de l'émission sonore maximale du flot. Pour une proportion de poids lourds donnée, c'est la valeur du débit tous véhicules qui donnerait, pour la même valeur de %PL et pour les vitesses à vide VL et PL, la puissance d'émission sonore maximale correspondant à la situation de saturation acoustique.

Qhps	débit tous véhicules à l'heure de pointe du soir
%HPS	pourcentage du débit tous véhicules à l'heure de pointe du soir par rapport au TMJA
Cvp	équivalence trafic entre VL/PL
K	concentration en véhicules
j	indice de la bande de tiers d'octave
R(j)	répartition spectrale de la puissance d'émission
R1	catégorie de revêtements R1 regroupant les techniques de revêtements suivantes : BBTM 0/6 types 1 et 2 BBUM 0/6 BBDr 0/10 BBTM 0/10 type 2
R2	catégorie de revêtements R2 regroupant les techniques de revêtements suivantes : BBTM 0/10 type 1 BBSG 0/10 ECF BBUM 0/10
R3	catégorie de revêtements R3 regroupant les techniques de revêtements suivantes : BC BBTM 0/14 BBSG 0/14 ES 6/10 ES 10/14
BBTM	Béton Bitumineux Très Mince
BBUM	Béton Bitumineux Ultra Mince
BBDr	Béton Bitumineux Drainant
BBSG	Béton Bitumineux Semi-Grenu
ECF	Enrobé Coulé à Froid
BC	Béton de Ciment
ES	Enduit Superficiel
a	âge du revêtement dans le correctif pour le calcul de la composante roulement
ΔL	correctif pour le calcul de la composante moteur des PL
E	émission sonore d'un véhicule définie, par convention, par la relation : $E = L_{wV} - 10 \log V - 50 \quad dB(A)$ Elle est égale numériquement au $L_{eq,111}$ provoqué par un véhicule de puissance acoustique L_{wV} , circulant à la vitesse V km/h sur une voie rectiligne distante de 50 m du point de mesure, sur site dégagé (pas d'écran ni de bâtiment à proximité), et avec sol réfléchissant

E_{qPL}

facteur d'équivalence acoustique entre PL et VL

GdB80

référence au "Guide du Bruit des Transports Terrestres - Prévion des niveaux sonores"
CETUR, novembre 1980

Annexe 2 – Formulaire

Deux types de niveaux de pression sonore sont utilisés en bruit des transports :

- le **niveau équivalent** adapté à la caractérisation d'un bruit relativement stable ou à évolution lente comme le bruit d'un trafic fluide,
- le **niveau maximal**, adapté à la caractérisation d'un événement comme le bruit au passage d'un véhicule.

Les niveaux sonores sont fonction de la puissance acoustique des sources, de leur vitesse, de la distance source/observation. On utilise en bruit des transports des expressions simplifiées. L'objet de ce formulaire est de donner les relations entre les différentes quantités.

Le niveau de pression sonore

Le niveau de pression sonore s'exprime en décibels. Il est défini par une relation de la forme

$$L = 10 \log p_m^2 / p_o^2 \quad (1)$$

où p_m^2 est une moyenne de la pression quadratique et p_o une pression de référence. Systématiquement la pression acoustique est prise avec la pondération fréquentielle A. On parle donc de niveau pondéré A.

Niveau de pression sonore équivalent

Le niveau de pression sonore équivalent caractérise un bruit sur une durée T donnée. Il utilise pour p_m la moyenne de la pression quadratique. Il peut dépendre du moment considéré. Noté $LA_{eq,T}(t)$ il est donné par la relation :

$$LA_{eq,T}(t) = 10 \log \frac{p_T^2}{p_o^2} \quad p_T^2 = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t p_A^2(\tau) d\tau \quad (2)$$

L'évolution du bruit du trafic peut être par exemple caractérisée par l'évolution du niveau équivalent pris sur une heure $LA_{eq,1h}$.

Niveau de pression sonore FAST

Le bruit d'un véhicule en mouvement est caractérisé par l'évolution de son niveau de pression sonore au passage. La moyenne considérée pour la pression quadratique est une moyenne pondérée dite FAST. Le niveau de pression sonore est dénommé niveau de pression sonore FAST. Noté LA_{FAST} il est donné par la relation

$$LA_{FAST}(t) = 10 \log \frac{p_{FAST}^2}{p_o^2} \quad p_{FAST}^2 = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{6t-\tau}{10}} p_A^2(\tau) d\tau \quad (3)$$

où t et τ sont exprimés en secondes. La contribution de $p_A^2(\tau)$ au niveau FAST est d'autant plus faible que $t - \tau$ est important i.e. que l'instant d'occurrence τ est éloigné de l'instant d'observation t .

Niveau de pression sonore d'un véhicule

L'émission acoustique d'un véhicule est représentée par l'émission d'un ensemble de sources ponctuelles, le plus souvent omnidirectionnelles. Le niveau de pression sonore provoqué par l'ensemble des sources est pris égal à la somme énergétique des niveaux sonores provoqués chacun par une source³².

La relation de base utilisée en bruit des transports pour évaluer les niveaux de pression sonore est celle donnant la pression quadratique provoquée par une source ponctuelle en champ libre³³

³² On dit que les sources sont non corrélées

³³ Il n'y a pas d'écran entre la source et le point d'observation, ni d'élément réflecteur dans le voisinage.

$$p_m^2(t) = \rho_o c_o \frac{W_m(t)}{4\pi r^2(t)} \quad (4)$$

W_m est la puissance acoustique efficace de la source³², r est la distance à la source, ρ_o est la masse volumique de l'air et c_o la célérité des ondes acoustiques dans l'air.

Le facteur temps permet de prendre en compte le déplacement de la source et la variation éventuelle de la puissance rayonnée (ralentissement ou accélération du véhicule par exemple). L'effet Doppler dû au mouvement de la source est négligé dans cette expression simplifiée.

Niveau de puissance sonore

Le niveau de puissance sonore L_w est défini par la relation

$$L_w = 10 \log \frac{W}{W_o} \quad (5)$$

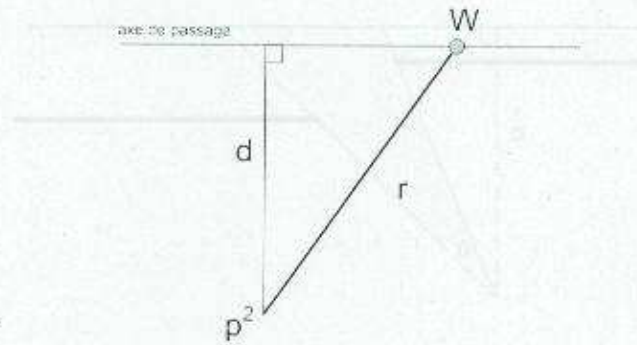
où W_o est la puissance de référence.

Relation entre grandeurs de référence

$$p_o^2 = \rho_o c_o \frac{W_o}{r_o^2} \quad (6)$$

quantité	valeur	unité
p_o	$2 \cdot 10^{-5}$	Pa
W_o	10^{-12}	Watt
$\rho_o c_o$	400	Ns/m ⁴
r_o	1	m

³²Puissance moyenne prise sur un temps court



Géométrie

Notations

$$L_p(r) \equiv 10 \log \frac{p^2(r)}{p_o^2} \tag{7}$$

$$L_{A,max} \equiv 10 \log \frac{p_{A,max}^2}{p_o^2} \tag{8}$$

$p_{A,max}^2$ est le maximum de la pression quadratique FAST, relevé (en l'absence d'écran) à la distance normalisée $d_n = \sqrt{7.5^2 + 1.2^2}$ (distance horizontale de 7.5 m par rapport à l'axe de passage et hauteur de 1.2 m par rapport au sol).

Formules

$$L_p(r) = L_W - 20 \log \frac{r}{r_0} - 10 \log(2\pi) \tag{9}$$

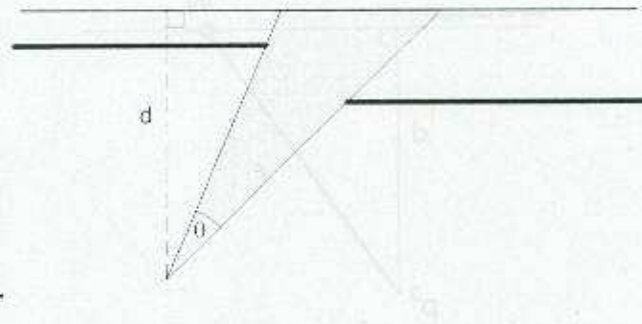
$$L_{A,max} = L_W - 20 \log \frac{d_n}{r_0} - 10 \log 2\pi \tag{10}$$

Approximations à 0.01 dB

$$L_p(r) \approx L_W - 20 \log \frac{r}{r_0} - 7,98 \tag{11}$$

$$L_{A,max} = L_W - 25,59 \tag{12}$$

Niveau de pression sonore équivalent



Notation

$$L_{eqT} = 10 \log \frac{p_T^2}{p_o^2} \quad (13)$$

Formules

$$L_{eqT}(d) = L_W - 10 \log vTd + 10 \log \frac{\theta}{\pi} - 10 \log 2 \quad (14)$$

$$L_{eqT}(d) = L_{A,max} - 10 \log \frac{vTd}{d_n^2} + 10 \log \theta \quad (15)$$

$$L_{eqT}(d_n) = L_{A,max} - 10 \log \frac{vT}{d_n} + 10 \log \theta \quad (16)$$

L'angle θ est introduit pour prendre en compte un effet d'écran éventuel (cf. illustration).

Niveaux équivalents sur 1 heure, approximations numériques

- V indique une vitesse exprimée en km/h.
- d indique une distance en mètres

Pour simplifier l'écriture, les grandeurs unitaires seront souvent omises dans les formules (on écrira par exemple $\log Vd$ au lieu de $\log(Vd/V_o d_o)$)

Leq1H à la distance d

$$L_{eq1H}(d) = L_W - 10 \log Vd + 10 \log \frac{\theta}{\pi} - 33.01 \quad (17)$$

$$L_{eq1H}(d) = L_{A,max} - 10 \log Vd + 10 \log \frac{\theta}{\pi} - 7.41 \quad (18)$$

Leq1H à la distance d_n

$$L_{eq1H}(d_n) = L_W - 10 \log V + 10 \log \frac{\theta}{\pi} - 41.81 \quad (19)$$

$$L_{eq1H}(d_n) = L_{A,max} - 10 \log V + 10 \log \frac{\theta}{\pi} - 16.21 \quad (20)$$

Bruit créé par un tronçon

Les nouvelles valeurs d'émission sont exprimées en puissance acoustique par mètre de voie. Ce chapitre donne les formules élémentaires concernant le bruit créé par un tronçon de voie et établit la correspondance entre le niveau de puissance unitaire par mètre de voie $L_{W/m/veh}$ et le niveau maximum au passage $L_{A,max}$.

Puissance sonore par mètre de voie

Un débit q veh/s de véhicules du même type, circulant sur une voie à la vitesse v m/s correspond à une densité de voie q/v véhicules/mètre.

Si W est la puissance acoustique moyenne des véhicules, la puissance W_{im} par unité de longueur de voie est :

$$W_{im} = W \frac{q}{v} \text{ watt/m} \quad (21)$$

Pour un débit Q veh/h et une vitesse V km/h ceci donne

$$W_{im} = W \frac{Q}{1000 V} \text{ watt/m} \quad (22)$$

Le niveau de puissance sonore par unité de longueur de voie, noté $L_{W/m}$, est donné par la relation :

$$L_{W/m} = 10 \log \frac{W_{im}}{W_0 \times 1m} = L_W + 10 \log \frac{Q}{1veh/h} - 10 \log \frac{V}{1km/h} - 30 \quad (23)$$

Le niveau de puissance unitaire³⁵ noté $L_{W/m/veh}$ est alors³⁶

$$L_{W/m/veh} = L_W - 10 \log V - 30 \quad (24)$$

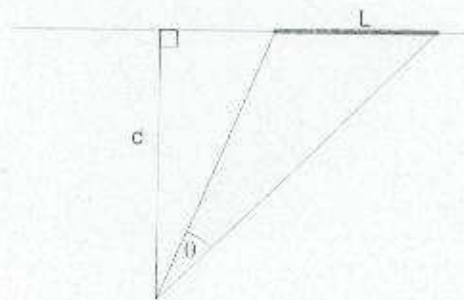
La correspondance entre $L_{W/m/veh}$ et le $L_{A,max}$ du véhicule est établie en utilisant les équations 10 et 24. On obtient :

$$L_{W/m/veh} = L_{A,max} - 10 \log V - 30 + 10 \log 2\pi d_n^2 \quad (25)$$

Soit à 0.01 dB près :

$$L_{W/m/veh} \approx L_{A,max} - 10 \log V - 4,4 \quad (26)$$

Niveau de pression sonore créé par un tronçon



³⁵ i.e. correspondant à un débit de 1 véhicule/heure

³⁶ On simplifie ici encore les formules en n'introduisant pas les grandeurs unitaires.

Si la puissance acoustique est constante sur une longueur L de tronçon, la pression quadratique créée par cet élément de longueur est [35] :

$$p_L^2 = \frac{\rho_0 c_0}{2\pi} W_{im} \theta \frac{1}{d} \quad (27)$$

le niveau de pression sonore associé est

$$L_{eqL} = L_{W_{im}} + 10 \log \frac{\theta}{2\pi} - 10 \log d \quad (28)$$

Bruit à très grande distance

A très grande distance ($(L/d \ll 1)$), et sans qu'il soit nécessaire que la puissance acoustique soit constante, on peut écrire

$$p_L^2 = \frac{\rho_0 c_0}{2\pi r^2} \overline{W_{im}} \times L \quad (29)$$

et

$$L_{eqL} = L_{\overline{W_{im}}} + 10 \log L - 20 \log r \quad (30)$$

où $\overline{W_{im}}$ est la moyenne de W_{im} sur la longueur L et r est la distance du milieu du tronçon au point d'observation.

Annexe 3 - Note d'information relative au calcul prévisionnel de bruit routier



Sétra

avril 2007

Calcul prévisionnel de bruit routier

Profils journaliers de trafic sur routes et autoroutes interurbaines

Economie
Environnement
Conception

77

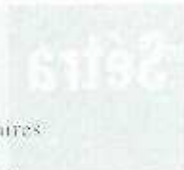
Les études de bruit routier doivent évaluer les niveaux sonores sur des périodes spécifiques de la journée (jour, nuit, soirée, etc.). Pour ce faire, le bureau d'études acoustiques a besoin d'hypothèses de débits de véhicules légers et de poids lourds sur chacune de ces périodes.

Cette note expose, pour les routes et autoroutes interurbaines, une méthode et des formules permettant d'estimer ces débits à partir des débits journaliers existants ou prévus sur l'infrastructure. Elle annule et remplace la note d'information n° 70 (septembre 2002).

Sommaire

1. Contexte d'utilisation	2
2. Enjeu	2
3. Démarche à adopter pour la détermination des débits par période	3
4. Formules d'estimation des débits	4
Bibliographie	7
Annexe : exemples de tronçons classés par fonction	8





1. Contexte d'utilisation

2

Les études de bruit routier peuvent être réalisées pour des objectifs variés :

- l'étude d'impact d'un projet routier et la vérification du respect des exigences réglementaires (décret n° 95-22 du 9 janvier 1995 [1], arrêté du 5 mai 1995 [2]) ;
- la résorption d'une situation d'exposition sonore excessive, telle que, pour le réseau routier national, les points noirs bruit (Circulaire du 25 mai 2004 relative au bruit des infrastructures de transports terrestres [3]) ;
- l'évaluation des effets d'un projet routier sur le réseau préexistant, et notamment la monétarisation de la variation des nuisances sonores (instruction DR du 20 octobre 1998, en cours de révision [4]) ;
- le classement sonore d'une infrastructure (décret n° 95-21 du 9 janvier 1995 [5], arrêté du 30 mai 1996 [6]) ;
- la réalisation de diagnostics à l'échelle microscopique, tels que les cartes de bruit stratégiques définies par la directive européenne du 25 juin 2002, transposée en droit français par les articles L. 5721 à L. 5721-11 du code de l'environnement, le décret du 24 mars 2006 [7] et l'arrêté du 4 avril 2006 [8].

Ces démarches sont fondées sur l'évaluation du niveau sonore équivalent L_{Aeq} sur diverses périodes :

- 6h-22h et 22h-6h pour la réglementation relative aux projets routiers, la monétarisation des nuisances sonores et le classement sonore des infrastructures ;
- 6h-18h, 18h-22h et 22h-6h pour les cartes de bruit stratégiques (ces trois périodes étant agrégées dans l'indicateur global L_{den}) ;
- les quatre périodes pour la démarche de résorption des points noirs bruit.

2. Enjeu

2.1. Rappels d'acoustique routière

Sur route interurbaine, selon les vitesses pratiquées et les conditions de circulation, un poids lourd (PL) émet autant de bruit que 4 à 10 véhicules légers (VL). Pour réaliser une étude acoustique, le bureau d'études a donc besoin d'hypothèses de trafic séparées pour les VL et les PL, et ce pour chacune des périodes intéressées. L'acousticien ne peut procéder à une étude fiable à partir de seules hypothèses de trafic exprimées en trafic moyen journalier annuel (TMJA) tous véhicules ou en unités de véhicules particuliers (u.v.p.).

La contribution sonore du flot de véhicules, pour une catégorie donnée, est fonction du logarithme décimal du débit ; c'est la fameuse règle selon laquelle un doublement de trafic induit une augmentation du bruit de 3 dB(A). Une erreur relative sur les trafics correspond par conséquent à une erreur absolue sur les niveaux sonores ; pour reprendre l'exemple précédent, une erreur du simple au double sur l'estimation des trafics induit une erreur de 3 dB(A) sur l'estimation des niveaux sonores. Le risque d'erreur sur les niveaux sonores est donc le plus fort pour les périodes où le trafic est en valeur absolue le plus faible, en particulier la nuit.

2.2. Variété des profils de trafic

Le profil journalier du trafic est très variable selon la catégorie de véhicules et selon la catégorie d'infrastructure. La *figure 1* représente, pour l'échantillon de sites sur routes nationales (RN) décrit au chapitre 4, la part moyenne du trafic de chaque tranche horaire dans le trafic journalier, séparément pour les VL et les PL.

Seuls les VL sont sujets à une pointe en fin d'après-midi, celle-ci s'achevant dès 19 h. Le trafic PL est plus régulier au cours de la journée et décroît dès 18 h. En revanche, les PL circulent proportionnellement plus la nuit que les VL. Ainsi, le sondage de circulation effectué sur le réseau national interurbain en 1996-97 [12] a montré qu'en moyenne :

- sur les **routes nationales**, 7 % des VL et 14 % des PL circulent la nuit (entre 22 h et 6 h). La part des PL dans le trafic total est ainsi deux fois plus élevée la nuit (22 %) qu'entre 6 h et 22 h (11 %) ;
- sur les **autoroutes**, cette tendance est encore plus forte : 9 % des VL et 18 % des PL circulent la nuit. La proportion de PL dans le trafic total, égale à 14 % entre 6 h et 22 h, s'élève à 25 % la nuit.



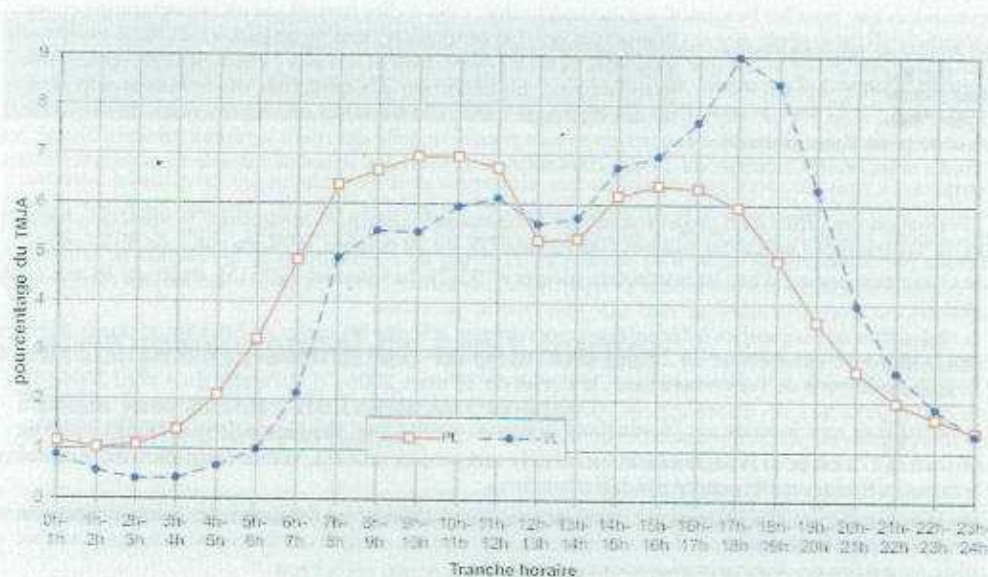


Figure 1 : profils moyens journaliers de trafic VL et PL sur RN par tranche horaire

En outre, il existe autour de ces moyennes de grandes disparités entre les axes de même catégorie administrative. Sur le réseau autoroutier, la proportion de PL la nuit varie de 8 % à plus de 40 % selon les sites. Sur route nationale, pour des TMA de même ordre, deux sites peuvent supporter des débits PL nocturnes variant du simple au triple.

La connaissance des seuls trafics journaliers (24 h) de VL et de PL et de la catégorie de route n'est donc pas suffisante pour estimer correctement les niveaux sonores nocturnes. Cette variabilité peut être réduite par une analyse de la **fonction de la route**. En effet, il apparaît que le trafic nocturne est lié à l'importance du trafic de transit : une route remplissant principalement une fonction de transit de longue distance (trajets inter-régionaux, voire internationaux) supporte un trafic de nuit proportionnellement plus important qu'une route utilisée pour des déplacements de courte distance (trajets domicile-travail, livraisons de proximité, etc.).

Ainsi, une étude acoustique qui méconnaîtrait le fonctionnement particulier de l'infrastructure en période nocturne risquerait de sous-estimer fortement les niveaux de bruit et de commettre ainsi une erreur très préjudiciable.

3. Démarche à adopter pour la détermination des débits par période

Les débits de véhicules par période peuvent être déterminés soit à partir de comptages, soit par l'application de formules d'estimation.

Le recours à des comptages pour évaluer la répartition journalière des trafics VL et PL n'est matériellement possible que pour l'étude d'une infrastructure existante. Par ailleurs, cette démarche peut dans certaines situations s'avérer très lourde et d'un coût disproportionné au regard des enjeux de l'étude, notamment lorsque le réseau étudié est étendu. Les comptages ne sauraient donc constituer une solution systématique.

C'est pourquoi des formules d'estimation des trafics sur les différentes périodes ont été établies à partir d'analyses statistiques ; elles sont présentées au chapitre 4. Ces formules sont fondées sur les valeurs moyennes obtenues pour chacun des sous-échantillons de sites exploités.

Le choix de la démarche à appliquer pour évaluer les trafics VL et PL sur les différentes périodes sera donc **fonction du contexte de l'étude**. Quelle que soit la démarche retenue, il est recommandé de **prendre systématiquement, pour sa mise en œuvre, le conseil d'un spécialiste des études de trafic**.

D'une façon générale, la réalisation et l'exploitation de comptages spécifiques par périodes ne sont recommandées que pour les besoins d'une étude détaillée, c'est-à-dire portant sur un axe déterminé et une zone localisée. Il est rappelé que ces comptages doivent obligatoirement distinguer VL et PL. L'attention est également attirée sur le fait que les profils de trafic (notamment de soirée et de nuit) présentent une certaine variabilité selon les jours de la semaine. La définition des modalités de comptage doit donc impérativement associer un spécialiste des études de trafic, afin d'assurer une représentativité suffisante vis-à-vis de la moyenne annuelle.

Ces comptages peuvent alors être exploités non seulement pour l'évaluation de la situation actuelle, mais aussi pour l'évaluation d'une situation future, si l'étude concerne un aménagement sur place (élargissement, projet de protections acoustiques, etc.) ou une déviation de faible longueur, sous réserve que l'étude prévisionnelle de trafic n'ait pas mis en évidence de modification de la fonction de la route. Pour l'évaluation d'une situation future, la répartition journalière observée pour chacune des catégories de véhicules est alors appliquée au TMJA de l'horizon de prévision.

Lorsque l'étude consiste à prévoir le bruit d'une route nouvelle, ou d'une route existante dont la fonction sera modifiée, l'analyse doit distinguer et traiter séparément :

- d'une part le trafic lié à des établissements locaux (grande zone industrielle, centre commercial important, etc.) susceptibles de générer une part substantielle de la circulation (notamment de poids lourds) prévue sur l'itinéraire. L'étude prévisionnelle de trafic doit comprendre une analyse du fonctionnement de ces générateurs selon les différentes périodes ;
- d'autre part le trafic dont les origines et les destinations sont "diffuses" ou lointaines, lié au fonctionnement général d'une agglomération ou d'un itinéraire : sa répartition entre les différentes périodes peut être estimée au moyen des formules exposées au chapitre 4.

L'utilisation des formules est également recommandée pour les études macroscopiques portant sur un réseau tendu, dont l'enjeu ne justifie généralement pas la réalisation de comptages spécifiques, excepté sur quelques axes bien identifiés.

4. Formules d'estimation des débits

4.1. Principe général

Les formules permettent d'estimer les débits sur les différentes périodes à partir de la connaissance du TMJA de VL et de PL, ainsi que de connaissances générales sur la structure du trafic. La procédure à suivre consiste :

- 1 à déterminer la catégorie de l'infrastructure (cf. 4.2) ;
- 2 à vérifier que les TMJA de VL et de PL figurent dans le domaine d'emploi des formules d'estimation (cf. 4.3) ;
- 3 à calculer les débits estimés pour chaque période de la journée (cf. 4.4).

Ces formules ont été établies par une étude du C.T.R. de l'Est décrite en partie 4.6.

4.2. Définition des catégories d'infrastructures

- Une route ou une autoroute est considérée comme ayant de façon prépondérante une **fonction longue distance** vis-à-vis du trafic poids lourds si celui-ci est caractérisé par des liaisons de caractère national ou international, et des véhicules de gros tonnage. La part des parcours effectués de nuit est importante. Les infrastructures constituant un maillon ou assurant la continuité d'un itinéraire international font en général partie de cette catégorie.
- Une route ou une autoroute est considérée comme ayant de façon prépondérante une **fonction régionale** vis-à-vis du trafic poids lourds si celui-ci est caractérisé par des trajets courts et répétitifs, ainsi que des véhicules de petits et moyens tonnages. La part des parcours effectués de nuit est faible. Les routes parallèles aux autoroutes font en général partie de cette catégorie (quelques exceptions notables : la RN 9 entre Narbonne et Perpignan, la RN 6 dans l'Yonne, la Côte d'Or et la Saône et Loire, la RN 77 entre Troyes et Châlons-en-Champagne).

Attention : qu'une route supporte une proportion de trafic PL élevée n'implique pas systématiquement qu'elle ait une fonction longue distance prépondérante : il existe des routes à fonction régionale pour lesquelles la part du trafic PL dans le TMJA est élevée, et des routes à fonction longue distance où cette part est plus faible. C'est la **nature** du trafic poids lourds, et non son volume ou sa proportion dans le trafic total, qui détermine la fonction de la route et les profils journaliers associés.

La détermination de la fonction la plus adaptée à l'infrastructure étudiée doit impérativement associer un spécialiste des études de trafic. Des exemples de sites composant l'échantillon exploité dans l'étude du Cnrm de l'Est, fournis en annexe à la présente note, peuvent également permettre de mieux appréhender la fonction d'une route étudiée, par similitude avec des itinéraires existants dont on aurait connaissance.

5

4.3. Domaine d'emploi des formules

Les formules présentées au chapitre 4.4 ne sont applicables qu'à des infrastructures situées hors agglomération. Le tableau 1 donne les bornes du domaine de trafic pour lequel les formules sont considérées comme valides. Les trois conditions (TMJA tous véhicules, TMJA de PL et part des PL dans le TMJA) doivent être respectées.

		TMJA tous véhicules (véh./j)	TMJA de PL (PL/j)	% PL dans le TMJA
Autoroutes de liaison	Fonction longue distance	7 000 à 70 000	1 300 à 13 500	18 à 30 %
	Fonction régionale	7 000 à 95 000	500 à 14 000	6 à 24 %
Routes interurbaines	Fonction longue distance	2 500 à 22 500	300 à 5 000	8 à 34 %
	Fonction régionale	2 500 à 22 000	250 à 2 500	5 à 17 %

Tableau 1 : domaine d'emploi des formules

4.4. Formules

La donnée de base utilisée pour les prévisions sonores est le débit moyen horaire de la période considérée. Les tableaux 2 et 3 présentent, séparément pour les VL et les PL, la relation entre ce débit horaire et le TMJA de la catégorie de véhicules considérée. Ces formules ne sont applicables que sur les domaines d'emploi précisés au chapitre 4.3.

		Débit moyen horaire de VL sur la période considérée			
		6h-22h	6h-18h	18h-22h	22h-6h
Autoroutes de liaison	Fonction longue distance	TMJA VL / 18	TMJA VL / 17	TMJA VL / 19	TMJA VL / 82
	Fonction régionale	TMJA VL / 17	TMJA VL / 17	TMJA VL / 18	TMJA VL / 100
Routes interurbaines	Fonction longue distance	TMJA VL / 17	TMJA VL / 17	TMJA VL / 19	TMJA VL / 110
	Fonction régionale	TMJA VL / 17	TMJA VL / 17	TMJA VL / 19	TMJA VL / 120

Tableau 2 : Formules d'estimation des débits moyens horaires pour les VL

		Débit moyen horaire de PL sur la période considérée			
		6h-22h	6h-18h	18h-22h	22h-6h
Autoroutes de liaison	Fonction longue distance	TMJA PL / 20	TMJA PL / 20	TMJA PL / 20	TMJA PL / 39
	Fonction régionale	TMJA PL / 19	TMJA PL / 17	TMJA PL / 28	TMJA PL / 50
Routes interurbaines	Fonction longue distance	TMJA PL / 19	TMJA PL / 17	TMJA PL / 27	TMJA PL / 51
	Fonction régionale	TMJA PL / 18	TMJA PL / 16	TMJA PL / 34	TMJA PL / 73

Tableau 3 : Formules d'estimation des débits moyens horaires pour les PL

Remarques :

- les coefficients diviseurs sont donnés à l'unité près. Pour ce qui concerne la période nocturne, il serait toutefois illusoire de leur accorder une telle précision. La fiabilité des formules sur l'échantillon de sites de l'étude est présentée au chapitre 4.5 ;
- du fait des arrondis, une reconstruction éventuelle du trafic 24 h à partir des valeurs horaires estimées au moyen de ces formules n'aboutira pas de façon exacte à la valeur du TMJA utilisée initialement. S'il est nécessaire d'afficher une cohérence parfaite entre les hypothèses de débits adoptées pour chaque période et le TMJA, il est recommandé de n'utiliser les formules que pour les périodes de soirée et de nuit, et de déduire les débits moyens horaires des périodes de jour (12 h ou 16 h) par complémentarité au TMJA. Cette procédure alternative n'induit aucune conséquence significative sur l'évaluation des niveaux sonores.

L'étude n'a porté que sur le réseau routier national. On admettra cependant que les formules "Routes interurbaines - fonction régionale" sont également applicables à des routes départementales et des voies communales, lorsque le trafic prévu est compris dans le domaine d'emploi défini au chapitre 4.3.

4.5. Fiabilité des formules

L'erreur acoustique commise sur chaque site de l'échantillon par l'application des formules d'estimation a été évaluée avec l'hypothèse qu'un PL "équivalent acoustiquement" à 4,5 VL sur autoroute et à 7 VL sur route (ces valeurs sont issues de travaux en cours sur l'actualisation des valeurs d'émission sonore des véhicules utilisées pour la prévision de bruit routier). Ces calculs d'erreurs ont été effectués pour chaque période ainsi que pour le L_{den} résultant de la combinaison des trois périodes 6h-18h, 18h-22h et 22h-6h.

Pour chaque catégorie d'infrastructure et chaque période, la distribution des erreurs a une allure relativement gaussienne. Dans ces conditions, l'intervalle de confiance à 95% associé à l'estimation a pour demi-largeur deux fois l'écart type de la distribution des erreurs. Le tableau 4 présente cet intervalle pour chaque catégorie d'infrastructure et chaque période.

		6h-22h	6h-18h	18h-22h	22h-6h	L _{den}
Autoroutes de liaison	Fonction longue distance	± 0,2	± 0,3	± 0,4	± 1,3	± 0,6
	Fonction régionale	± 0,3	± 0,5	± 0,6	± 2,1	± 0,9
Routes interurbaines	Fonction longue distance	± 0,3	± 0,5	± 0,8	± 1,7	± 0,9
	Fonction régionale	± 0,1	± 0,3	± 0,6	± 1,4	± 0,6

Tableau 4 : Intervalle de confiance à 95% associé à l'estimation des trafics par période, en dB(A)

Pour la période 6h-22h, l'intervalle de confiance à 95% est très étroit : l'estimation est très fiable. A l'inverse, l'intervalle associé à la période 22h-6h illustre la forte dispersion des profils de trafic en période nocturne, même lorsqu'on distingue les deux fonctions. Pour les autres périodes, les intervalles de confiance ont des largeurs intermédiaires.

4.6 Origine des formules et comparaison avec les formules antérieures

Une étude précédente [9] avait exploité les données issues du sondage de circulation 1996-97 et abouti à la publication dans la note d'information n° 70 [10] de formules relatives aux périodes 6h-22h et 22h-6h pour des infrastructures de fonction « longue distance » et de fonction « régionale ». Les formules ci-dessus sont issues d'une nouvelle étude du CITE de l'Est [11], portant sur 37 stations sur autoroute et 249 stations sur RN, conduite à partir des comptages horaires de la même base de données pour répondre à deux objectifs supplémentaires :

- la production de formules relatives aux périodes 6h-18h et 18h-22h ;
- la recherche d'un critère caractérisant une catégorie « Route à proximité d'agglomération », visant à rendre compte de l'influence des déplacements pendulaires des habitants de la frange de quelques dizaines de kilomètres autour d'une agglomération importante.

Pour cette recherche, le CITE de l'Est a étudié l'intérêt d'une segmentation des sites en fonction de divers critères supposés caractéristiques des déplacements pendulaires, tels que la prééminence de périodes de pointes. Il a conclu que contrairement aux attentes, une telle segmentation ne permettrait pas d'améliorer de façon significative la précision des formules d'estimation associées à chacune des périodes. La définition des catégories d'infrastructures figurant dans la note d'information n° 70 a donc été reprise à l'identique.

Comme précédemment, l'analyse statistique a déduit :

- des formules permettant d'estimer les débits de VL et de PL pour chacune des périodes, à partir de la connaissance de leurs débits moyens journaliers et de la catégorie de route ;
- le domaine d'emploi de ces formules ainsi qu'une indication de leur fiabilité.

Du fait de critères plus stricts appliqués aux données utilisées, l'échantillon de sites exploité dans la présente étude est légèrement différent de celui traité dans l'étude antérieure. Ceci n'induit toutefois que des différences mineures pour les coefficients diviseurs.

Pour la période 6h-22h, ces coefficients sont identiques. Pour la période de nuit, ils ne sont modifiés que pour les VL sur autoroute et les PL sur route : les nouveaux coefficients diviseurs sont légèrement supérieurs aux précédents, ce qui conduit pour un TMA donné à une estimation du trafic nocturne de la catégorie de véhicules plus faible de 4 à 9%, et à une estimation de sa contribution sonore diminuée de 0,2 à 0,4 dB(A). Étant donné que cette variation ne concerne, pour chaque fonction de route, que l'une des deux catégories de véhicules, son effet sur le bruit global est très limité.

La précision globale des formules sur les périodes 6h-12h et 22h-6h n'est pas modifiée de façon significative par rapport aux formules antérieures.

Bibliographie

- [1] Décret n° 95-22 du 9 janvier 1995 relatif à la limitation du bruit des aménagements et infrastructures de transports terrestres (JORF du 10/01/1995)
- [2] Arrêté du 5 mai 1995 relatif au bruit des infrastructures routières (JORF du 10/05/1995)
- [3] Circulaire DR-DTT-DPPR-DIV du 25 mai 2004 relative au bruit des infrastructures de transports terrestres
- [4] Circulaire DR n° 98-99 du 20 octobre 1998 et Instruction relative aux méthodes d'évaluation économique des investissements routiers en rase campagne (Fascicule spécial du BO n° 98-7)
- [5] Décret n° 95-21 du 9 janvier 1995 relatif au classement des infrastructures de transports terrestres et modifiant le code de l'urbanisme et le code de la construction et de l'habitation (JORF du 10/01/1995)
- [6] Arrêté du 30 mai 1996 relatif aux modalités de classement des infrastructures de transports terrestres et à l'isolation acoustique des bâtiments d'habitation dans les secteurs affectés par le bruit (JORF du 28/06/1996)
- [7] Décret n° 2006-361 du 24 mars 2006 relatif à l'établissement des cartes de bruit et des plans de prévention au bruit dans l'environnement et modifiant le code de l'urbanisme (JORF du 26/03/2006)
- [8] Arrêté du 4 avril 2006 relatif à l'établissement des cartes de bruit et des plans de prévention du bruit dans l'environnement (JORF du 05/04/2006)
- [9] Trafic et études acoustiques sur autoroutes et routes nationales - Actualisation de l'étude 97 utilisation des données du sondage 900 à partir des données des recensements et sondages 96, *Rapport d'étude*, Cem de l'Est, avril 2002, 93 p.
- [10] Calcul prévisionnel de bruit routier : paramètres de trafic sur routes et autoroutes interurbaines. *Note d'information Économie, Environnement, Conception n°70*, Sctra, septembre 2002, 8 p.
- [11] Trafic et études acoustiques sur autoroutes et routes nationales - Approfondissement de l'étude 2002, *Rapport d'étude*, Cem de l'Est, décembre 2006.
- [12] Structure du trafic sur le réseau routier national - Analyse et évaluation. *Dossier thématique*, Sctra, 1999, 30 p.

Annexe : exemples de tronçons classés par fonction

8 Avertissement : cette annexe présente à titre d'exemple des sites composant le sondage de circulation 1996-97 et exploités lors de l'étude, classés selon la fonction de l'infrastructure. Cette classification est donc liée à l'état du réseau à cette époque. Elle a pu évoluer depuis lors, du fait par exemple de la mise en service de nouveaux itinéraires.

A - Autoroutes

Dans l'étude du Cere de l'Est, le critère utilisé pour définir les autoroutes de fonction longue distance a été : "la proportion de poids lourds ayant 4 essieux ou plus parmi le trafic total MJA de poids lourds est supérieure ou égale à 75 %".

A titre d'exemple, les itinéraires suivants peuvent être cités :

Autoroutes à fonction longue distance (hors zones urbaines)	Autoroutes à fonction régionale (hors zones urbaines)
A6 sur l'ensemble du tracé	A16 dans le Nord
A5 entre Troyes et Langres	A28 entre l'A29 et Rouen
A7 sur l'ensemble du tracé	A38 en Côte-d'Or
A9 sur l'ensemble du tracé	A42 sur l'ensemble du tracé
A10 entre Bois et Poitiers	A68 entre Toulouse et Albi
A26 dans l'Aube	A75 sur l'ensemble du tracé
A31 de Nancy à Dijon	A203 dans les Ardennes
A36 sur l'ensemble du tracé	
A63 sur l'ensemble du tracé	
A71 dans l'Allier	

B - Routes nationales

Dans l'étude du Cere de l'Est, le critère utilisé pour définir les RN de fonction longue distance a été : "la proportion de poids lourds ayant 4 essieux ou plus parmi le trafic total MJA de poids lourds est supérieure ou égale à 60 %".

Les itinéraires suivants, présentés à titre d'exemple, sont regroupés par zone géographique afin de faciliter la recherche. Ils sont identifiés par leur numérotation à l'époque du sondage (1996-97), donc indépendamment des transferts aux départements intervenus récemment.



	RN à fonction longue distance	RN à fonction régionale
Région Centre	RN 10 de Chartres à Tours RN 76 de Bourges à RN 7 (Nièvre) RN 20 de la Francilienne à Orléans RN 152 entre Tours et Langon RN 60 d'Orléans à Troyes	RN 10 de Tours à Châtellerault RN 76 de Bourges à Vierzon (A71) RN 152 entre Tours et Orléans RN 143 entre Tours et Châteauneuf
Normandie et Ouest	RN 31 entre Beauvais et Rouen RN 12 entre Dreux et Mayenne RN 138 entre Rouen et Alençon RN 137 entre Reims et Saintes	RN 13 dans la Manche et le Calvados RN 174 dans le Calvados (entre l'A84 et Vire) RN 166 dans le Morbihan (de Vannes à Ploërmel) RN 15 d'Yvetot à Rouen RN 151 de Poitiers à l'A20 (Indre)
Sud Ouest	RN 10 entre Poitiers et Bordeaux RN 141 entre Limoges et Angoulême RN 21 entre Limoges et Périgueux	RN 20 de Brive-la-Gaillarde à Cahors RN 20 au sud de Toulouse RN 113 dans le Lot-et-Garonne RN 134 dans les Landes RN 124 dans le Gers RN 21 entre Périgueux (RNN9) et Tarbes
Massif Central Auvergne	RN 145 de Bellac (Creuse) à Montluçon RN 7 dans l'Allier	RN 89 en Corrèze RN 88 de St Etienne à Albi RN 120 de Uzerche (Corrèze) à Aurillac RN 102 en Haute-Loire
Méditerranée	RN 568 de Fos-sur-Mer à le RN 113 RN 9 de Narbonne à Perpignan	RN 7 dans le Vaucluse, les Bouches-du-Rhône et le Var RN 106 dans le Gard RN 86 dans le Gard RN 112 de Béziers à Albi
Rhône-Alpes Bourgogne	RN 504 dans l'Ain et en Savoie RN 6 dans l'Yonne, en Côte d'Or et en Saône-et-Loire	RN 84 à Nantes RN 71 de Troyes à Dijon RN 85 de Vizille (Isère) à Gap RN 102 en Ardèche
Nord-Est Franche-Comté	RN 4 dans la Marne, la Meuse, la Meurthe-et-Moselle et la Moselle RN 44 entre Reims et Vitry-le-François RN 77 entre Troyes et Châlons-en-Champagne RN 67 entre St-Dizier et Chaumont	RN 57 entre Vesoul et Pomarive RN 62 entre Sarreguemines et Haguenau RN 74 en Haute-Marne RN 35 dans la Meuse
Nord-Picardie	RN 2 entre La Capelle et Laon RN 29 dans la Somme RN 31 entre Beauvais et Reims RN 25 dans la Somme	RN 1 entre Amiens et la limite sud de l'Oise RN 41 dans le Nord et le Pas-de-Calais RN 43 entre Douai et Charleville-Mézières RN 43 entre Calais et Béthune RN 49 de Valenciennes à Maubeuge

Articles	Comptes rendus de conférences	Notes de lecture
105	115	125
135	145	155
165	175	185
195	205	215
225	235	245
255	265	275
285	295	305
315	325	335
345	355	365
375	385	395
405	415	425
435	445	455
465	475	485
495	505	515
525	535	545
555	565	575
585	595	605
615	625	635
645	655	665
675	685	695
705	715	725
735	745	755
765	775	785
795	805	815
825	835	845
855	865	875
885	895	905
915	925	935
945	955	965
975	985	995
1005	1015	1025
1035	1045	1055
1065	1075	1085
1095	1105	1115
1125	1135	1145
1155	1165	1175
1185	1195	1205
1215	1225	1235
1245	1255	1265
1275	1285	1295
1305	1315	1325
1335	1345	1355
1365	1375	1385
1395	1405	1415
1425	1435	1445
1455	1465	1475
1485	1495	1505
1515	1525	1535
1545	1555	1565
1575	1585	1595
1605	1615	1625
1635	1645	1655
1665	1675	1685
1695	1705	1715
1725	1735	1745
1755	1765	1775
1785	1795	1805
1815	1825	1835
1845	1855	1865
1875	1885	1895
1905	1915	1925
1935	1945	1955
1965	1975	1985
1995	2005	2015
2025	2035	2045
2055	2065	2075
2085	2095	2105
2115	2125	2135
2145	2155	2165
2175	2185	2195
2205	2215	2225
2235	2245	2255
2265	2275	2285
2295	2305	2315
2325	2335	2345
2355	2365	2375
2385	2395	2405
2415	2425	2435
2445	2455	2465
2475	2485	2495
2505	2515	2525
2535	2545	2555
2565	2575	2585
2595	2605	2615
2625	2635	2645
2655	2665	2675
2685	2695	2705
2715	2725	2735
2745	2755	2765
2775	2785	2795
2805	2815	2825
2835	2845	2855
2865	2875	2885
2895	2905	2915
2925	2935	2945
2955	2965	2975
2985	2995	3005

96 avenue
Aristide Briand
BP 100
92225 Bagneux Cedex
France
téléphone :
33 (0)1 46 11 31 30
télécopie :
33 (0)1 46 11 31 69
internet : www.setra.
equipement.gov.fr

Rédacteurs – Renseignements techniques

- François Besnard – Setra – téléphone : 33 (0)1 46 11 35 87
96 Avenue Aristide Briand – BP 100 – 92225 Bagneux
France – François.Besnard@equipement.gov.fr

Document imprimé par téléchargement à partir des sites web du Setra :

- Internet : <http://www.setra.equipement.gov.fr/>
- L'Observatoire National du Ministère de l'Équipement : <http://www.setra.fr/>

*Document de la publication : Jean-Claude Pons – Directeur de Setra
C'est par lui que l'équipement de la mer et de l'océanographie a été créé.
L'abonnement au Setra est indispensable pour la recevabilité permanente, partielle ou totale,
de Setra 2007 – Téléphone : 0356 96 1833 – 2250 46 57*

AVERTISSEMENT

La collection des notes d'information du Setra est destinée à fournir des informations rapides, à caractère pratique, sur les sujets les plus récents de l'équipement de la mer et de l'océanographie. Elle ne saurait être présentée comme le résultat d'un travail de recherche scientifique. Les données et les conclusions qui y sont présentées sont le fruit de la pratique professionnelle. Elles ne sont à titre d'exemple et ne constituent pas nécessairement une recommandation officielle de l'État.

Le Setra appartient
au Réseau Scientifique
et Technique
de l'Équipement



Annexe 4 – Valeurs d'émission sonore des véhicules

Formules en L_{Amax}

Principe général

$$L_{Amax}(7,50\text{ m}) = L_{roulement} \oplus L_{moteur}$$

Lroulement est fonction de la vitesse (V) et de la catégorie de revêtement (R1, R2 ou R3).

Lmoteur est fonction de la déclivité (p), de l'allure (stabilisée, accélération, décélération) et de la vitesse (V)

Domaine de validité visé en vitesse :

V_{min} = 20 km/h en allure stabilisée
5 km/h en accélération et décélération

V_{max} = 130 km/h VL
100 km/h PL

Remarque : les formules en accélération et décélération ont été produites à partir de 5 km/h. Toutefois il a été décidé ultérieurement de produire des puissances d'émission spécifiques pour les tronçons de démarrage et d'arrêt, et de ne publier les formules en fonction de V que pour $V > 25$ km/h.

Formules Lroulement

Revêtements jeunes (0 à 2 ans)

catégorie de revêtements	VL	PL
R1	$73,3 + 31 \log(V/90)$	$82,5 + 30 \log(V/80)$
R2	$77,3 + 30,1 \log(V/90)$	$85,6 + 30 \log(V/80)$
R3	$79,8 + 31,4 \log(V/90)$	$86,6 + 30 \log(V/80)$

V en km/h

Sources VL : [h] ; sources PL : [b, m]

Pour les PL, les valeurs à 80 km/h proviennent de [b], la pente est imposée égale à 30 [m] comme décrit dans le chapitre 3.5 "Démarche de production des composantes roulement".

Effet du vieillissement de 2 à 10 ans [k]

- R1 : VL + 4 dB(A) PL + 2,4 dB(A)
- R2 : VL + 2 dB(A) PL + 1,2 dB(A)
- R3 : VL + 1,6 dB(A) PL + 1 dB(A)

Formules Lmoteur

VL allure stabilisée, toutes déclivités

V - km/h	20 à 30	30 à 110	110 à 130
Lmoteur	60,6	$66,3 + 12,0 \log(V/90)$	$64,6 + 31,3 \log(V/90)$

sources : route horizontale : [a, h] ; montée et descente : [i]

VL en accélération, toutes déclivités

V - km/h	5 à 20	20 à 100	100 à 130
Lmoteur	$85,7 + 24,1 \log(V/90)$	70	$68,2 + 38,6 \log(V/90)$

source : [h]

VL en décélération, toutes déclivités

V - km/h	5 à 10	10 à 25	25 à 80	80 à 110	110 à 130
Lmoteur	55,5	$73,3 + 18,7 \log(V/90)$	$66 + 5,5 \log(V/90)$	$66,3 + 12 \log(V/90)$	$64,6 + 31,3 \log(V/90)$

source : [b]

VL combinaisons allure * déclivité

Principe général :

	montée $2\% \leq p \leq 6\%$	descente $2\% \leq p \leq 6\%$
accélération	max(accélération*route horizontale ; allure stabilisée*montée)	= accélération*route horizontale
décélération	= décélération*route horizontale	max(décélération*route horizontale ; allure stabilisée*descente)

source : [g] modifié par [j]

Ce qui donne avec les formules précédentes :

	montée $2\% \leq p \leq 6\%$	descente $2\% \leq p \leq 6\%$
accélération	= accélération*route horizontale	= accélération*route horizontale
décélération	= décélération*route horizontale	= décélération*route horizontale

En définitive la déclivité n'intervient donc pas pour les VL.

PL toutes allures, toutes déclivités

V - km/h	5 à 70	70 à 100
Lmoteur	$73 + \Delta L$	$73,8 + 13 \log(V/80) + \Delta L$

ΔL est un correctif indépendant de la vitesse, fonction de l'allure et de la déclivité.

ΔL	déclivité		
	$0\% \leq p \leq 2\%$	montée $2\% \leq p \leq 6\%$	descente $2\% \leq p \leq 6\%$
allure stabilisée	0 dB(A)	$2 \cdot (p - 2)$	$1 \cdot (p - 2)$
accélération	5 dB(A)	$\max[2 \cdot (p - 2) ; 5]$	5 dB(A)
décélération	0 dB(A)	0 dB(A)	$1 \cdot (p - 2)$

p en % (valeur absolue)

sources des formules :

- pour les "combinaisons simples" dans le domaine 20-70 km/h :

	déclivité		
	$0\% \leq p \leq 2\%$	montée $2\% \leq p \leq 6\%$	descente $2\% \leq p \leq 6\%$
allure stabilisée	[b]	[c]	[c]
accélération	[d]	---	---
décélération	[e]	---	---

- pour les "combinaisons simples" dans les domaines 5-20 et 70-100 km/h : [f] pour allure stabilisée * route horizontale sur 70-100 km/h, [g] pour les autres ;

- pour les combinaisons allure * déclivité : [g] modifié par [j] (modification sans conséquence pour les PL).

Formules en $L_{W/m}$ (1véh/h)

Relation entre $L_{W/m}$ (1 véh/h) et L_{Amax}

Rappel : $L_{Amax}(7,50\text{ m}) = L_W - 25,6$ (cf. formulaire INRETS)
 où L_W est le niveau de puissance d'un véhicule.

Pour un débit unitaire de 1 véh/h, la densité de véhicules par mètre de voie est $1/(1000.V)$, avec V en km/h.
 La puissance par mètre de voie pour 1 véh/h est donc

$$L_{W/m}(1\text{ véh/h}) = L_W - 10.\log(V) - 30$$

soit $L_{W/m}(1\text{ véh/h}) = L_{Amax}(7,50\text{ m}) - 10.\log(V) - 4,4$

Transcription des formules produites en L_{Amax}

On note $L_{W/m}(1\text{ véh/h}) = A - B.\log(V/V_{réf})$

Si la formule de L_{Amax} est de la forme $L_{Amax} = a + b.\log(V/V_{réf})$, alors

$$A = a - 10.\log(V_{réf}) - 4,4 \quad B = b - 10$$

Si la formule de L_{Amax} est de la forme $L_{Amax} = a + b.\log(V)$, alors

$$A = a + (b - 10).\log(V_{réf}) - 4,4 \quad B = b - 10$$

Composante roulement

Revêtements jeunes (0 à 2 ans)

catégorie de revêtements	VL	PL
R1	$49,4 - 21 \log(V/90)$	$59,1 + 20 \log(V/80)$
R2	$53,4 - 20,1 \log(V/90)$	$62,1 + 20 \log(V/80)$
R3	$55,9 + 21,4 \log(V/90)$	$63,1 + 20 \log(V/80)$

V en km/h

Revêtements âgés (10 ans ou plus)

On ajoute aux valeurs précédentes l'effet du vieillissement, ce qui donne :

catégorie de revêtements	VL	PL
R1	$53,4 + 21 \log(V/90)$	$61,5 + 20 \log(V/80)$
R2	$55,4 + 20,1 \log(V/90)$	$63,3 + 20 \log(V/80)$
R3	$57,5 + 21,4 \log(V/90)$	$64,1 + 20 \log(V/80)$

V en km/h

Correctif selon l'âge

A appliquer à la valeur à 10 ans :

Age du revêtement (a)		VL		PL	
		≤ 2 ans	2 à 10 ans	≤ 2 ans	2 à 10 ans
Catégorie de revêtements	R1	-4	$0,5.(a-10)$	-2,4	$0,3.(a-10)$
	R2	-2	$0,25.(a-10)$	-1,2	$0,15.(a-10)$

	R3	-1,6	0,2.(a-10)	-1	0,12.(a-10)
--	-----------	------	------------	----	-------------

Composante moteur

Remarque : les formules en accélération et décélération ne seront publiées que pour $V > 25$ km/h. Pour les vitesses inférieures, voir les puissances d'émission spécifiques pour les tronçons de démarrage et d'arrêt.

VL allure stabilisée, toutes déclivités

V - km/h	20 à 30	30 à 110	110 à 130
Lmoteur	$36,7 - 10 \log(V/90)$	$42,4 + 2,0 \log(V/90)$	$40,7 + 21,3 \log(V/90)$

VL en accélération, toutes déclivités

V - km/h	5 à 20	20 à 100	100 à 130
Lmoteur	$61,8 + 14,1 \log(V/90)$	$46,1 - 10 \log(V/90)$	$44,3 + 28,6 \log(V/90)$

VL en décélération, toutes déclivités

V - km/h	5 à 10	10 à 25	25 à 80	80 à 110	110 à 130
Lmoteur	$31,6 - 10 \log(V/90)$	$49,4 + 8,7 \log(V/90)$	$42,1 - 4,5 \log(V/90)$	$42,4 + 2 \log(V/90)$	$40,7 + 21,3 \log(V/90)$

PL toutes allures, toutes déclivités

V - km/h	5 à 70	70 à 100
Lmoteur	$49,6 - 10 \log(V/80) + \Delta L$	$50,4 + 3 \log(V/80) + \Delta L$

ΔL est un correctif indépendant de la vitesse, fonction de l'allure et de la déclivité.

ΔL	déclivité		
	$0\% \leq p \leq 2\%$	montée $2\% \leq p \leq 6\%$	descente $2\% \leq p \leq 6\%$
allure stabilisée	0 dB(A)	$2.(p - 2)$	$1.(p - 2)$
accélération	5 dB(A)	$5 + \max[2.(p - 4,5); 0]$	5 dB(A)
décélération	0 dB(A)	0 dB(A)	$1.(p - 2)$

p en % (valeur absolue)

Remarque : pour le cas accélération en montée, l'écriture $5 + \max[2.(p - 4,5); 0]$ est préférée à $\max[2.(p - 2); 5]$ pour une meilleure cohérence d'affichage avec le tronçon de démarrage (voir plus loin).

$41,2 + 20 \log(V/80)$	$40,7 + 21,3 \log(V/90)$	R1
$42,4 + 2,0 \log(V/90)$	$42,4 + 2 \log(V/90)$	R2
$42,1 - 4,5 \log(V/90)$	$42,1 - 4,5 \log(V/90)$	R3

VL		VL		Catégorie de roulements
5 à 10 km/h	2 à 5 km/h	20 à 100 km/h	25 à 80 km/h	
$31,6 - 10 \log(V/90)$	$49,4 + 8,7 \log(V/90)$	$42,1 - 4,5 \log(V/90)$	$42,4 + 2 \log(V/90)$	R1
$36,7 - 10 \log(V/90)$	$42,4 + 2,0 \log(V/90)$	$40,7 + 21,3 \log(V/90)$	$40,7 + 21,3 \log(V/90)$	R2

Tronçons de démarrage et d'arrêt

Ces valeurs s'appliquent sur les 20 premiers mètres en aval ou sur les 20 derniers mètres en amont d'un point d'arrêt. On ne décompose pas en composantes moteur et roulement, les valeurs ci-dessous sont directement exprimées en $L_{w,m}(1 \text{ véh/h})$ et ne dépendent pas du revêtement (influence négligeable aux faibles vitesses).

Résultats de J.F. Hamet [1]

Valables uniquement sur route horizontale :

	VL		PL	
	V en extrémité, km/h	$L_{w,m}(1 \text{ véh/h}), \text{dB(A)}$	V en extrémité, km/h	$L_{w,m}(1 \text{ véh/h}), \text{dB(A)}$
démarrage	23,5	51,1	25	62,4
arrêt	22,5	44,5	25	58,0

Proposition F. Besnard : fixer pour tous les cas une vitesse en extrémité de 25 km/h.

Effet de la déclivité

Pour les VL, pas d'effet de la déclivité sur la composante moteur (cf. plus haut), donc pas d'effet ici non plus. Pour les PL, la déclivité a un effet sur la composante moteur. Si on considère que la composante roulement est négligeable sur ces tronçons, on peut directement appliquer le correctif ΔL vu plus haut, ce qui donne :

- démarrage en montée : $L_{w,m}(1 \text{ véh/h}) = 62,4 + \max[2.(p - 2) ; 5] - 5 = 62,4 + \max[2.p - 9 ; 0]$
- démarrage en descente : idem route horizontale ;
- arrêt en montée : idem route horizontale ;
- arrêt en descente : $L_{w,m}(1 \text{ véh/h}) = 58,0 + (p - 2)$

Synthèse :

	VL toutes déclivités	PL		
		route horizontale $0\% \leq p \leq 2\%$	montée $2\% \leq p \leq 6\%$	descente $2\% \leq p \leq 6\%$
tronçon de démarrage	51,1	62,4	62,4 $+ \max[2.(p - 4,5) ; 0]$	62,4
tronçon d'arrêt	44,5	58,0	58,0	58,0 + (p-2)

p en % (valeur absolue)

Les valeurs du tableau ci-dessus ont été établies sans tenir compte de l'effet du vieillissement. En tenant compte de l'effet du vieillissement, les valeurs sont alors les suivantes :

	VL toutes déclivités	PL		
		route horizontale $0\% \leq p \leq 2\%$	montée $2\% \leq p \leq 6\%$	descente $2\% \leq p \leq 6\%$
tronçon de démarrage	51,3	62,5	62,5 $+ \max[2.(p - 4,5) ; 0]$	62,5
tronçon d'arrêt	45,1	58,3	58,3	58,3 + (p-2)

Transcription des formules du guide du bruit

$$E = L_w - 10 \log(V) - 50$$

$$L_{Amax}(7,50 \text{ m}) = L_w - 25,6$$

$$\text{donc } L_{Amax}(7,50 \text{ m}) = E + 10 \log(V) + 24,4$$

$$L_{w,m}(1 \text{ véh/h}) = L_w - 10 \log(V) - 30$$

$$\text{donc } L_{w,m}(1 \text{ véh/h}) = E + 20$$

Sources des formules

- [a] Mail J. Lelong 19/11/2004
- [b] Rapport V. Steimer - "Abaques d'émission sonore : Synthèse des mesures en rampe et sur piste", avril 2001.
- [c] Rapport S. Doisy - "Abaques d'émission sonore - Complément TR en rampe et en descente", juin 2002.
- [d] Décision réunion novembre 2003 + Rapport S. Doisy "Mesures TR accélération/décélération", septembre 2004
- [e] Décision réunion septembre 2004 + Rapport S. Doisy "Mesures TR accélération/décélération", septembre 2004
- [f] Décision réunion mai 2004 (Transcrite en formule par F. Besnard)
- [g] Décision réunion novembre 2004
- [h] Note "Réactualisation des abaques du Guide du Bruit", J. Lelong, 22 mars 2005.
- [i] Décision réunion décembre 2005.
- [j] Décision réunion janvier 2006.
- [k] Décision réunion 30 novembre 2006.
- [l] Rapport J.F. Hamet - "Le tronçon acoustiquement homogène", chap. 5 (finalisation en cours en janvier 2007).
- [m] Décision réunion 19 janvier 2007.

type de tronçon	L _w (dB)	
	montée	décente
tronçon homogène	25,6	25,6
tronçon d'arrêt	20,0	20,0

type de tronçon	L _w (dB)	
	montée	décente
tronçon homogène	25,6	25,6
tronçon d'arrêt	20,0	20,0

Résultats graphiques

Les graphes donnés dans ce chapitre représentent les évolutions des niveaux sonores en fonction de la vitesse du nouveau guide de calcul des émissions sonores dues au trafic routier.

Chaque graphe concerne une catégorie de véhicules (VL ou PL) et une tranche d'âge des revêtements (âgés d'au maximum 2 ans ou âgés d'au moins 10 ans).

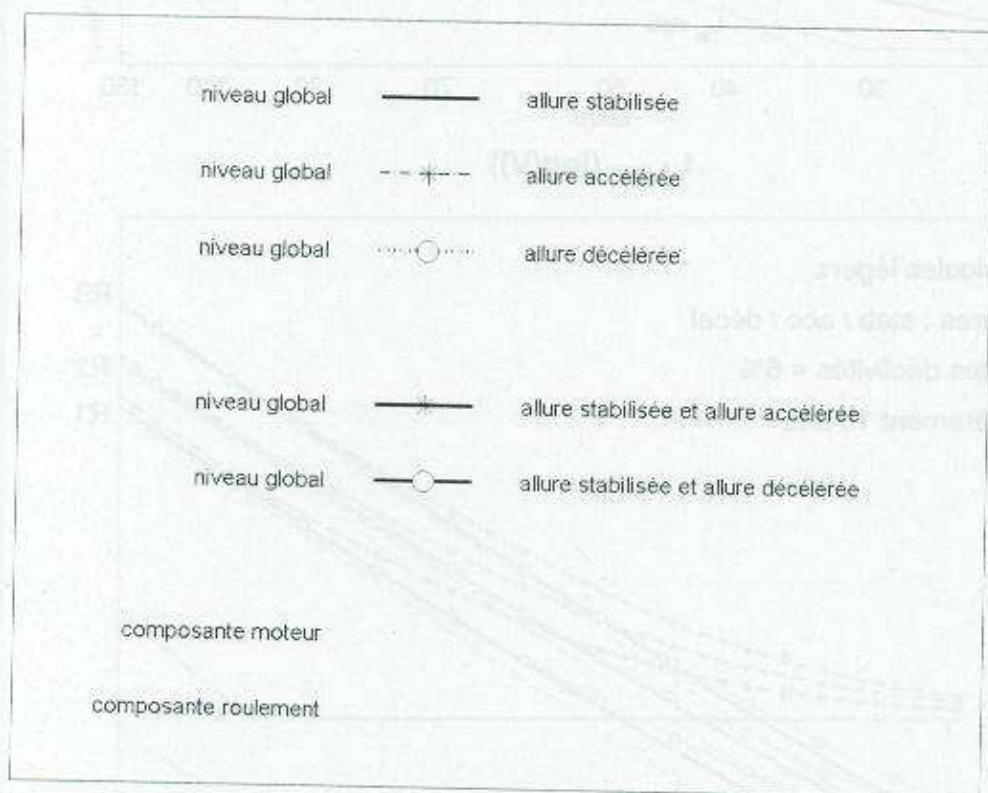
Les valeurs d'émission obtenues pour les VL ne dépendent que de l'allure, pas de la déclivité. On représente donc sur chaque graphe, pour les VL sur revêtements jeunes (âgés d'au maximum 2 ans), puis âgés d'au moins 10 ans, les évolutions des niveaux sonores pour toutes les déclivités (cf. figures A).

Les valeurs d'émission obtenues pour les PL dépendent de l'allure et de la déclivité. On représente pour les PL sur revêtement jeunes, âgés d'au maximum 2 ans, puis âgés d'au moins 10 ans :

- les évolutions des niveaux sonores pour l'allure stabilisée et toutes les déclivités (cf. figures B),
- les évolutions des niveaux sonores, pour l'allure accélérée et toutes les déclivités (cf. figures C),
- les évolutions des niveaux sonores pour l'allure décélérée et toutes les déclivités (cf. figures D).

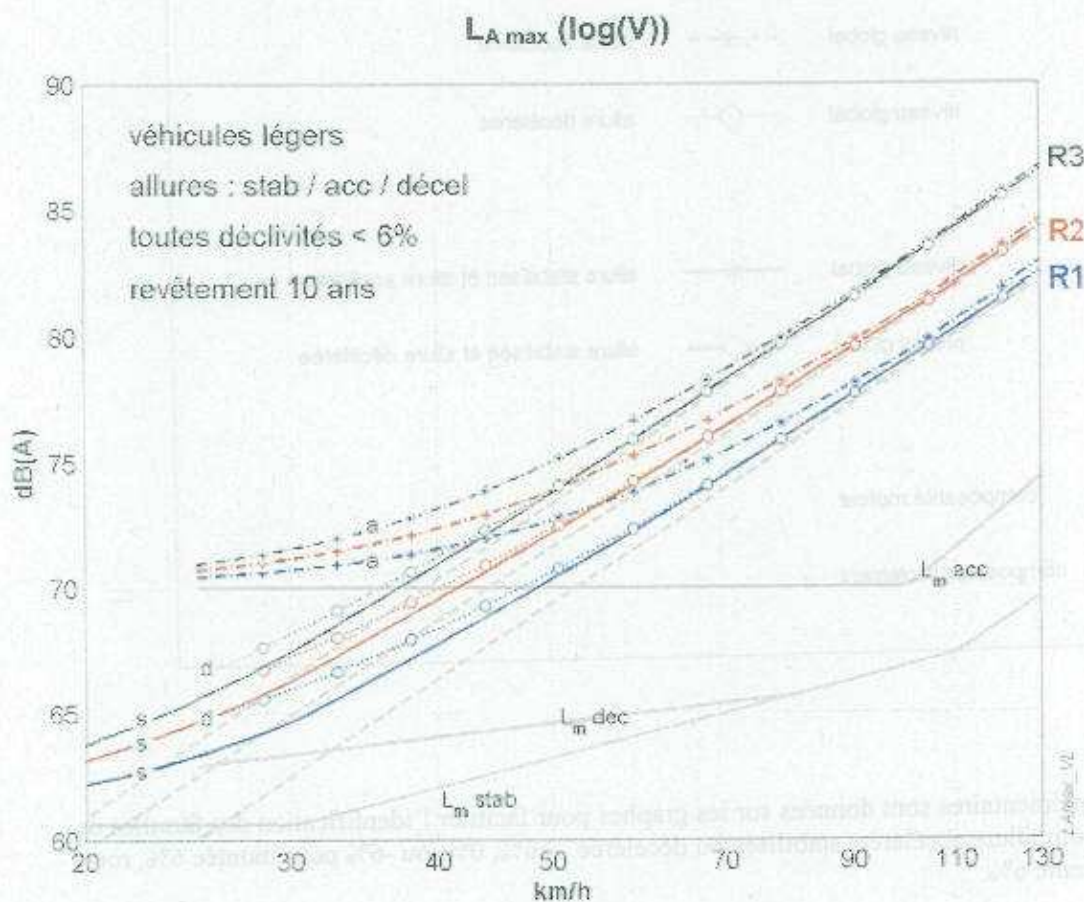
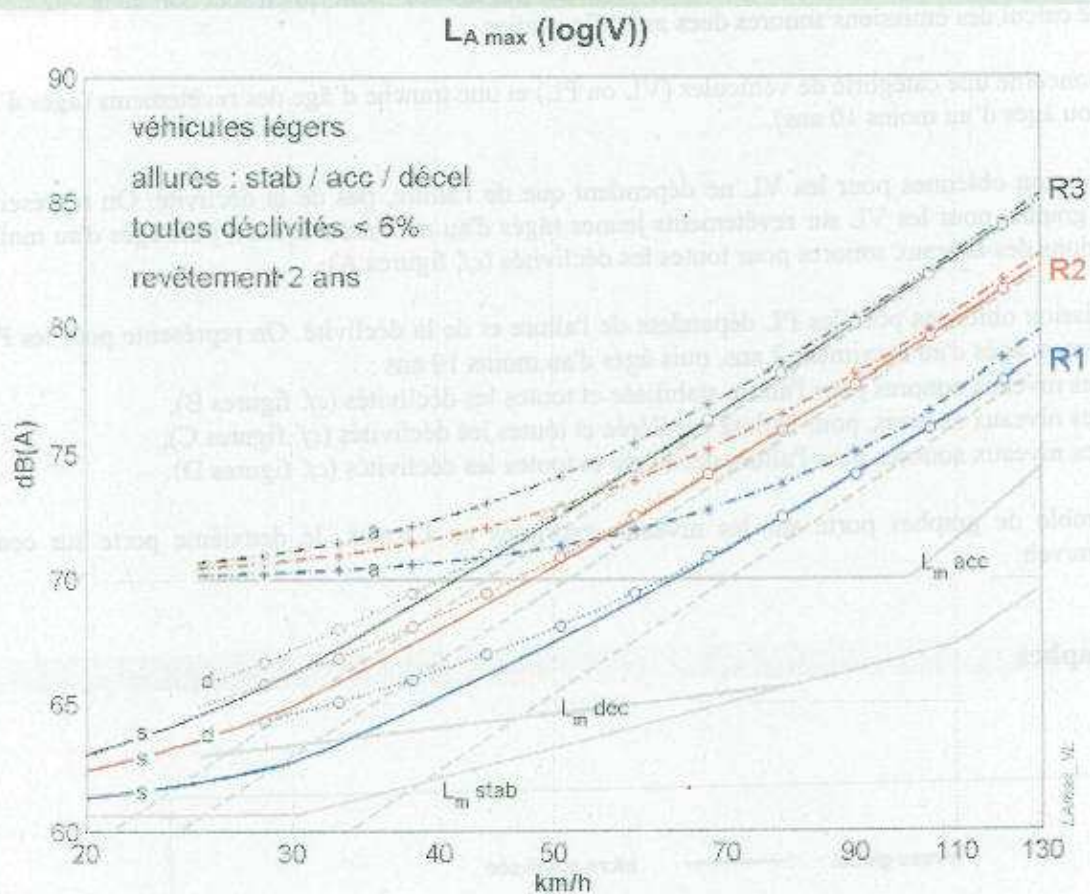
Le premier ensemble de graphes porte sur les niveaux exprimés en LAmax, le deuxième porte sur ceux exprimés en LW/m/veh.

Légende des graphes

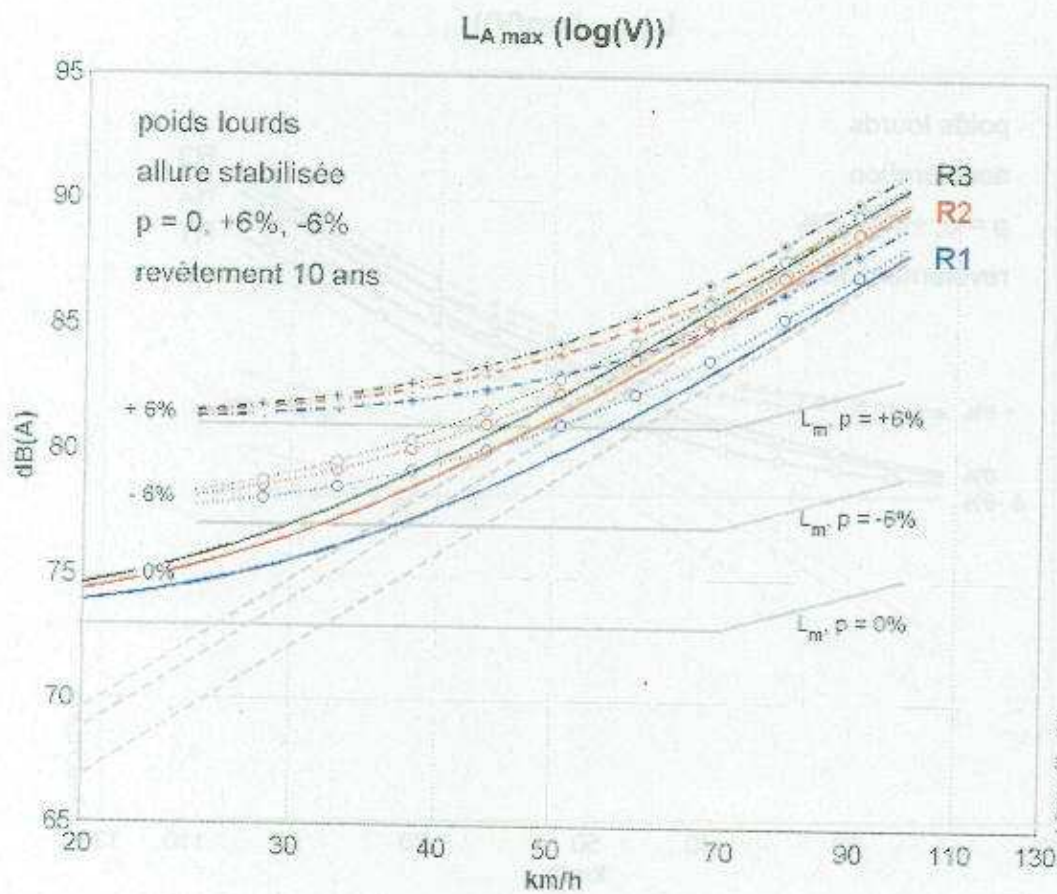
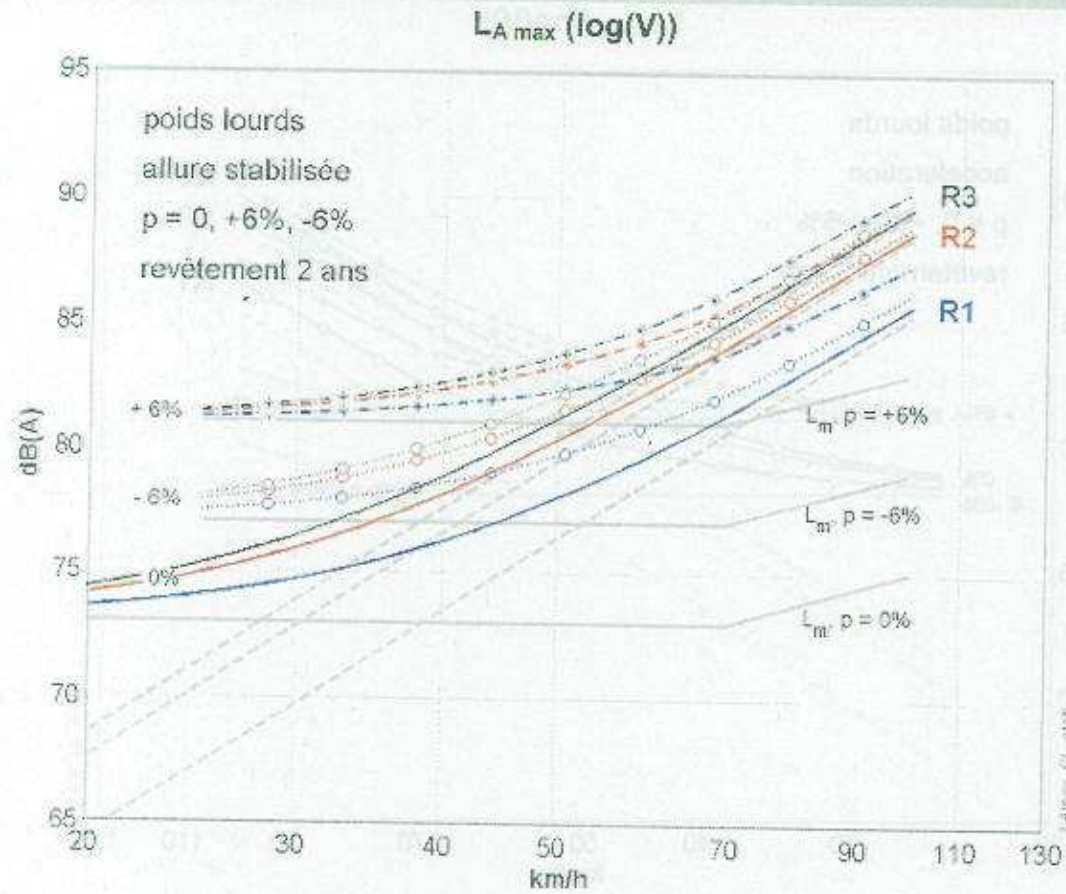


Des indications supplémentaires sont données sur les graphes pour faciliter l'identification des familles de courbes : a, s ou d pour allure accélérée, stabilisée ou décélérée ; +6%, 0%, ou -6% pour montée 6%, route horizontale, ou descente 6%.

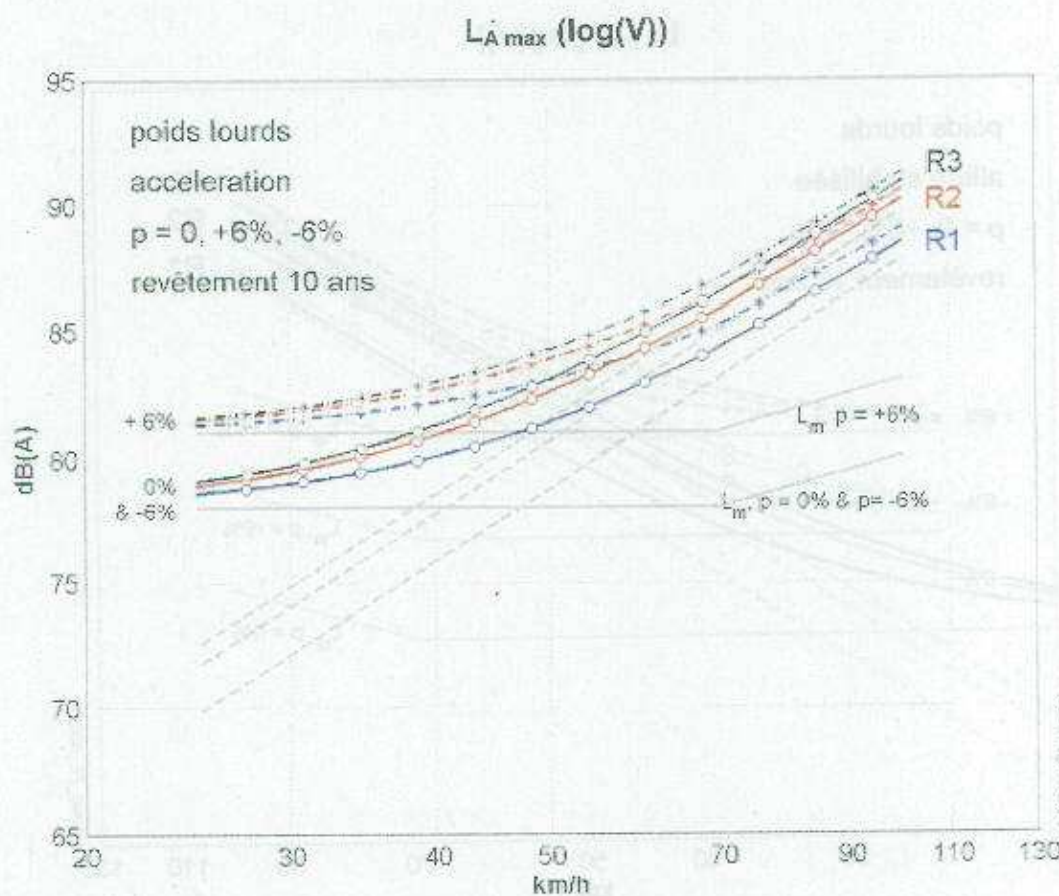
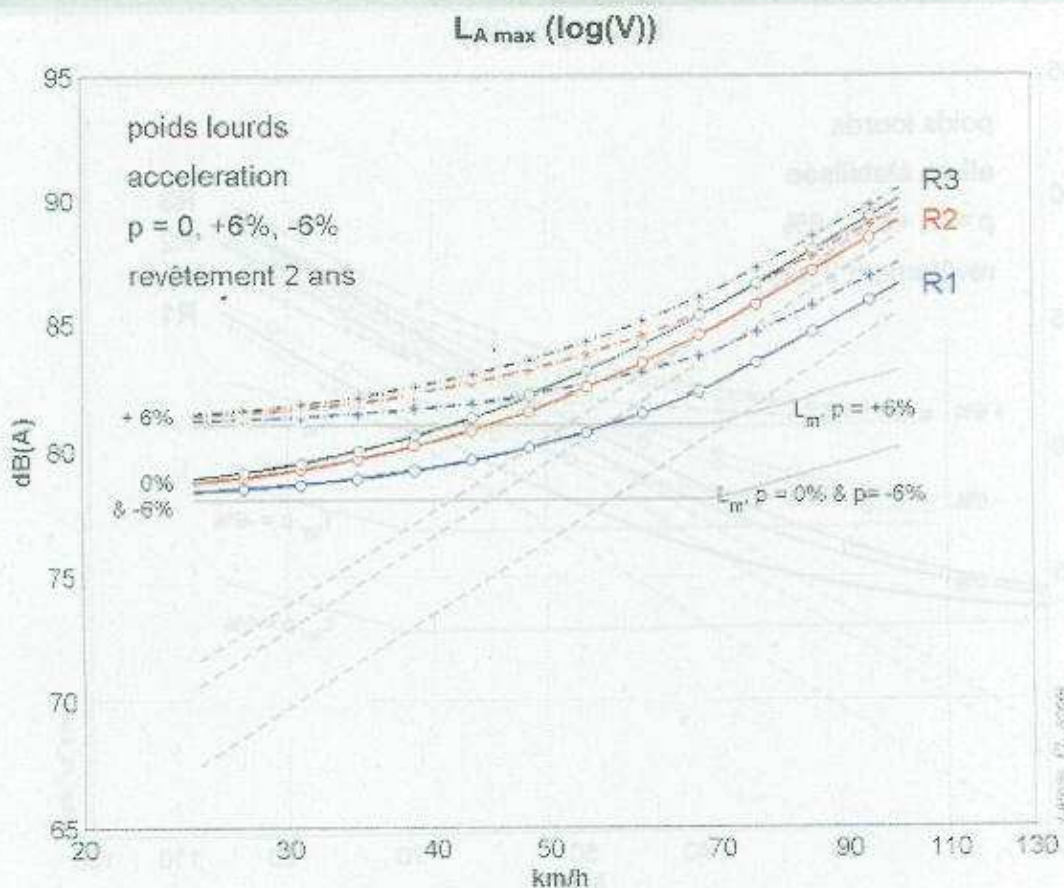
Graphes LAmax - VL (Figures A)



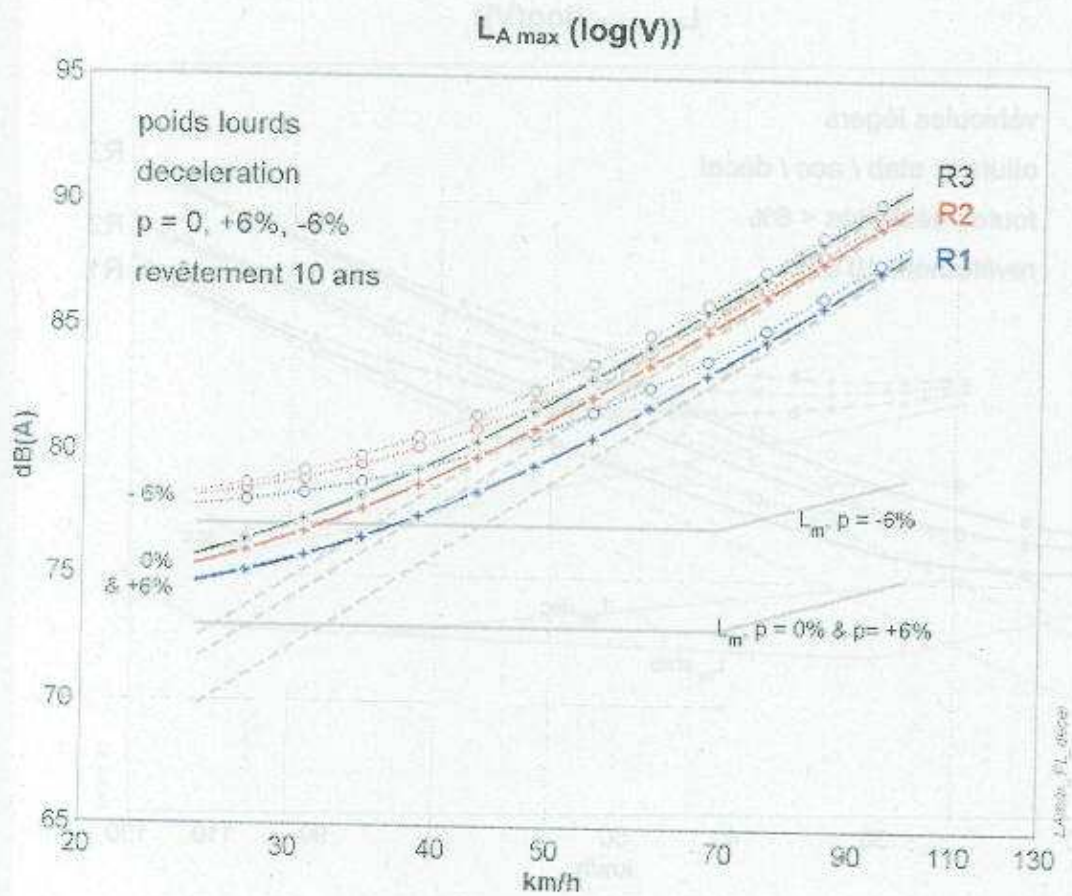
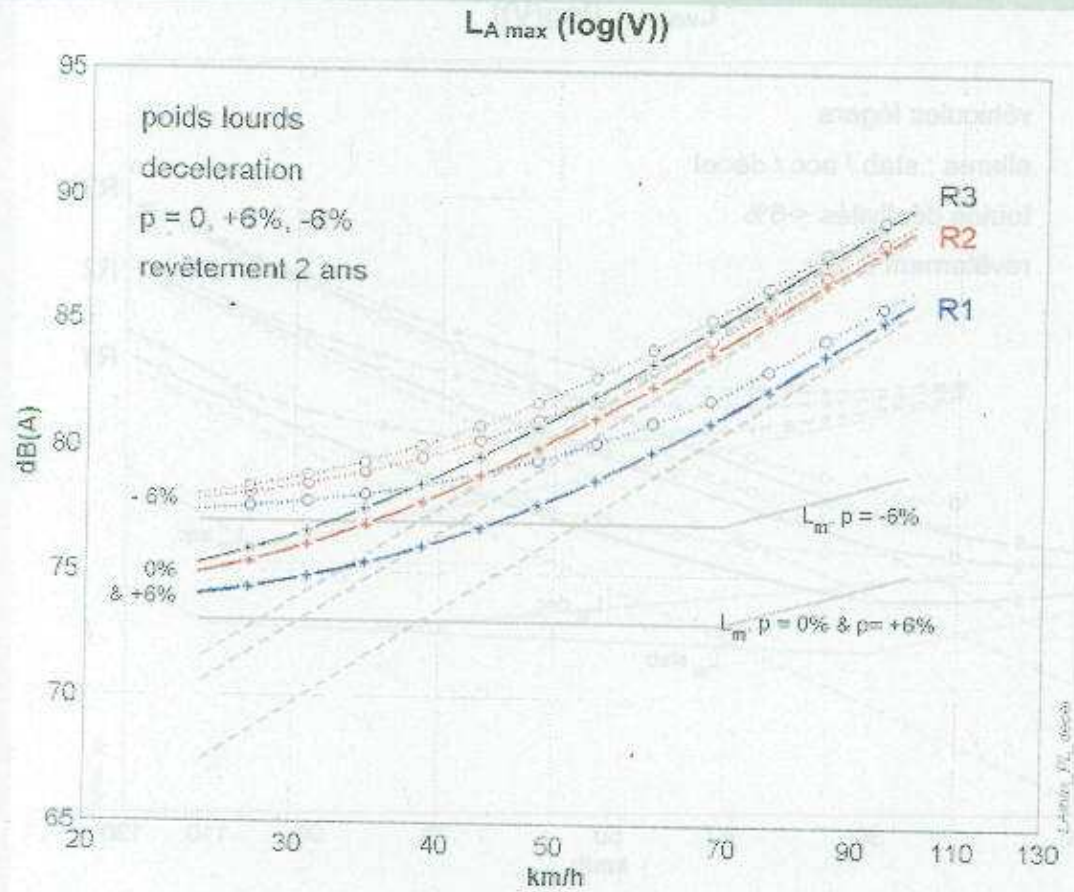
Graphes LAmax - PL, allure stabilisée (Figures B)



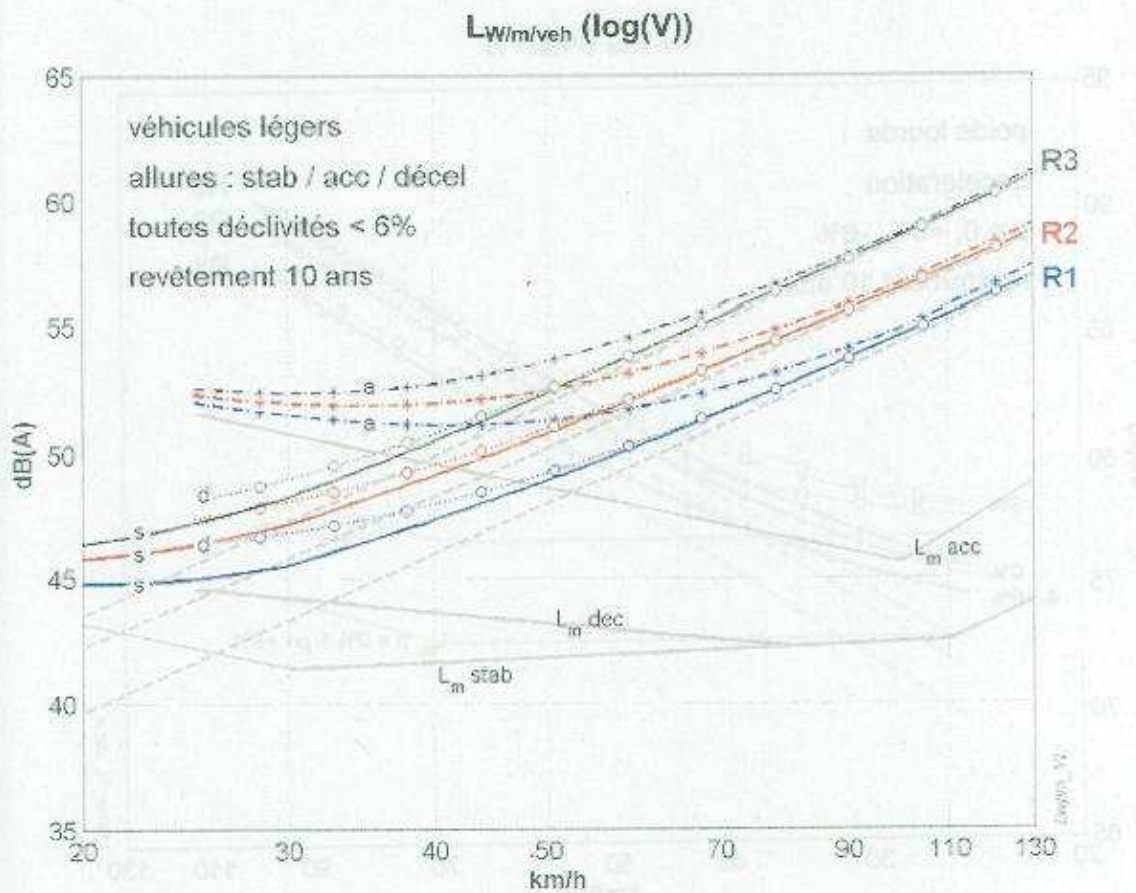
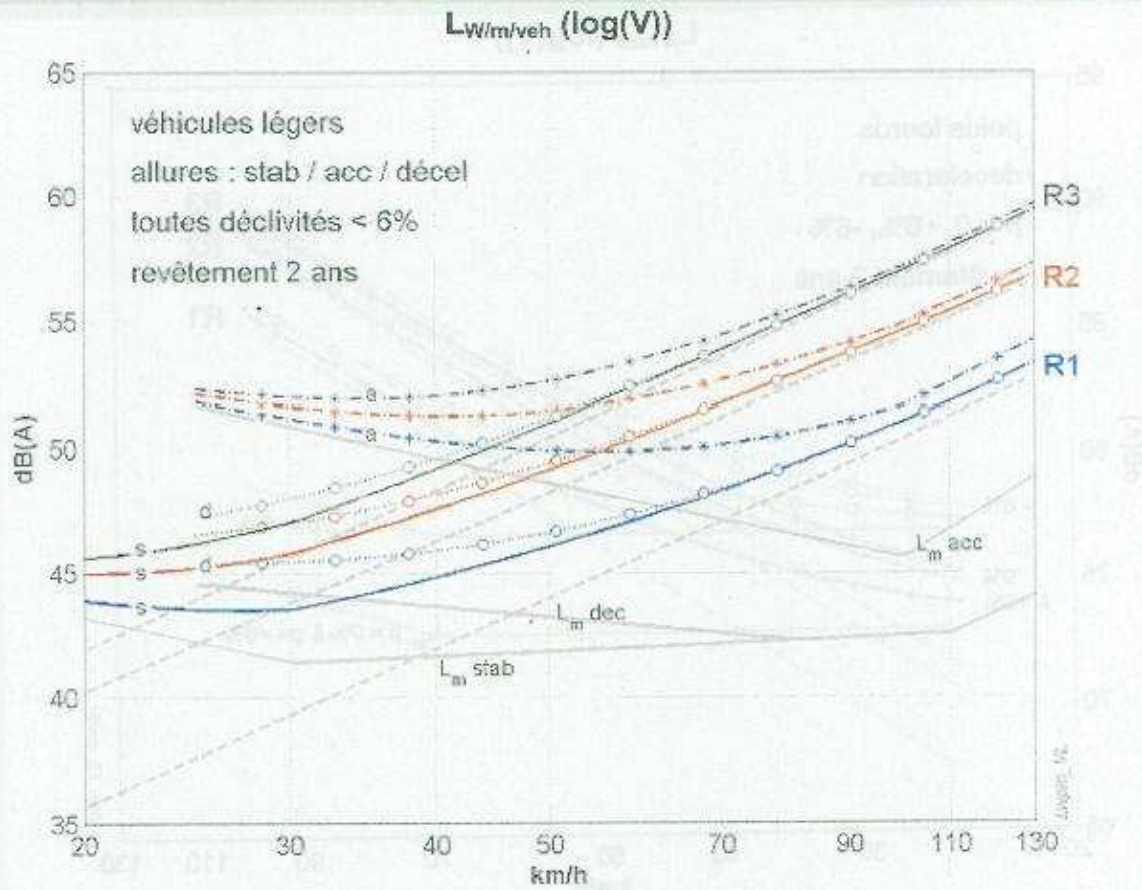
Graphes LAmax - PL, accélération (Figures C)



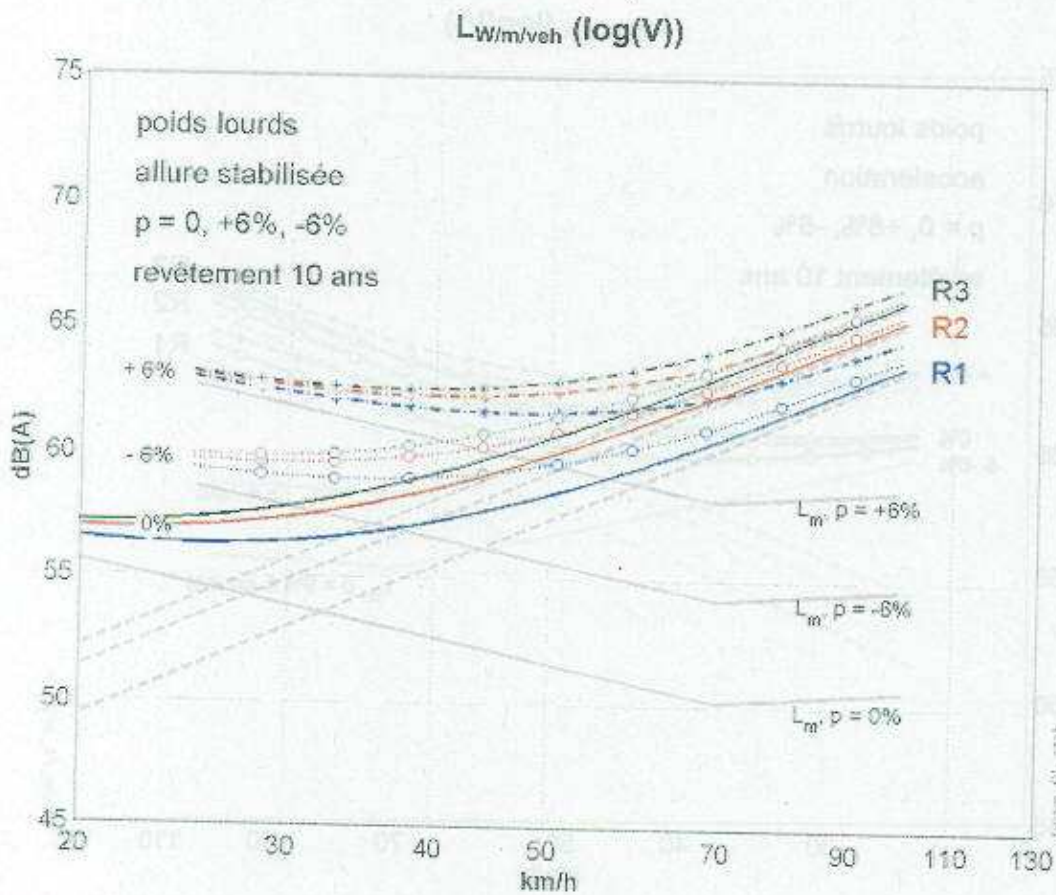
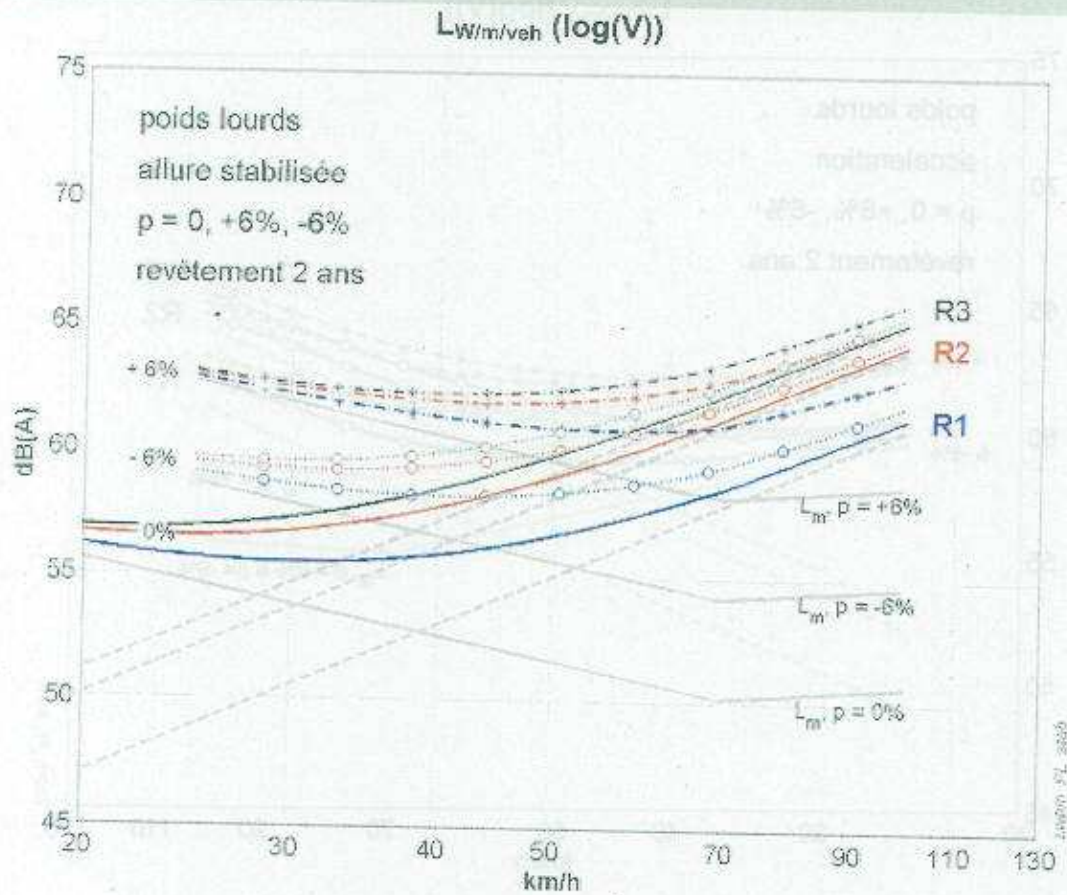
Graphes L_{Amax} - PL, décélération (Figures D)



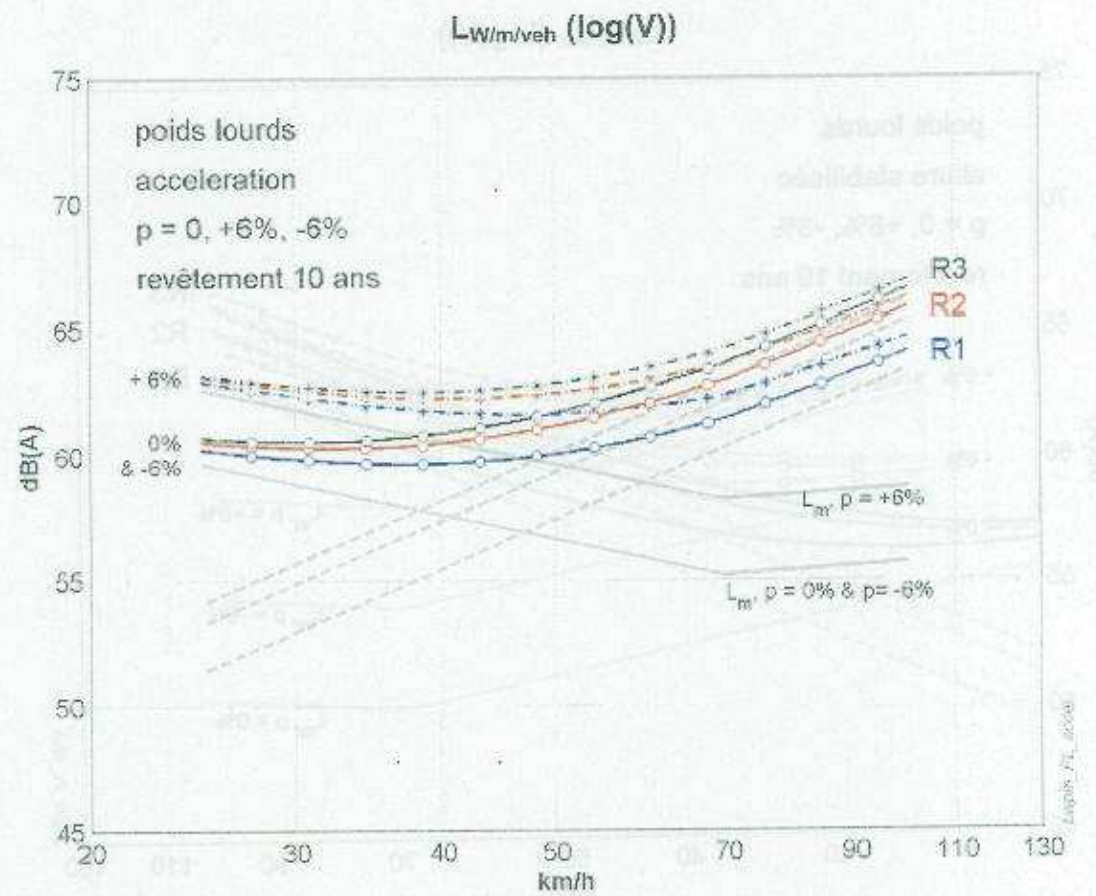
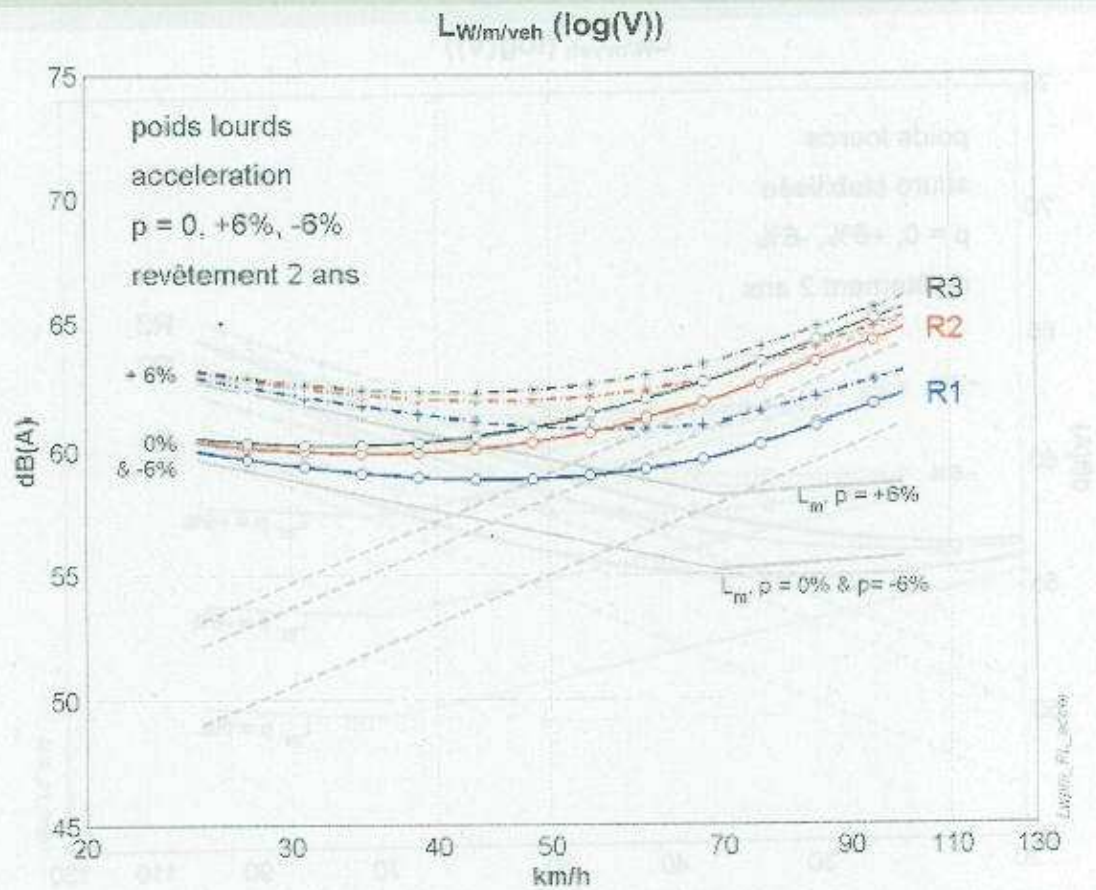
Graphes LW/m/veh – VL (Figures A)



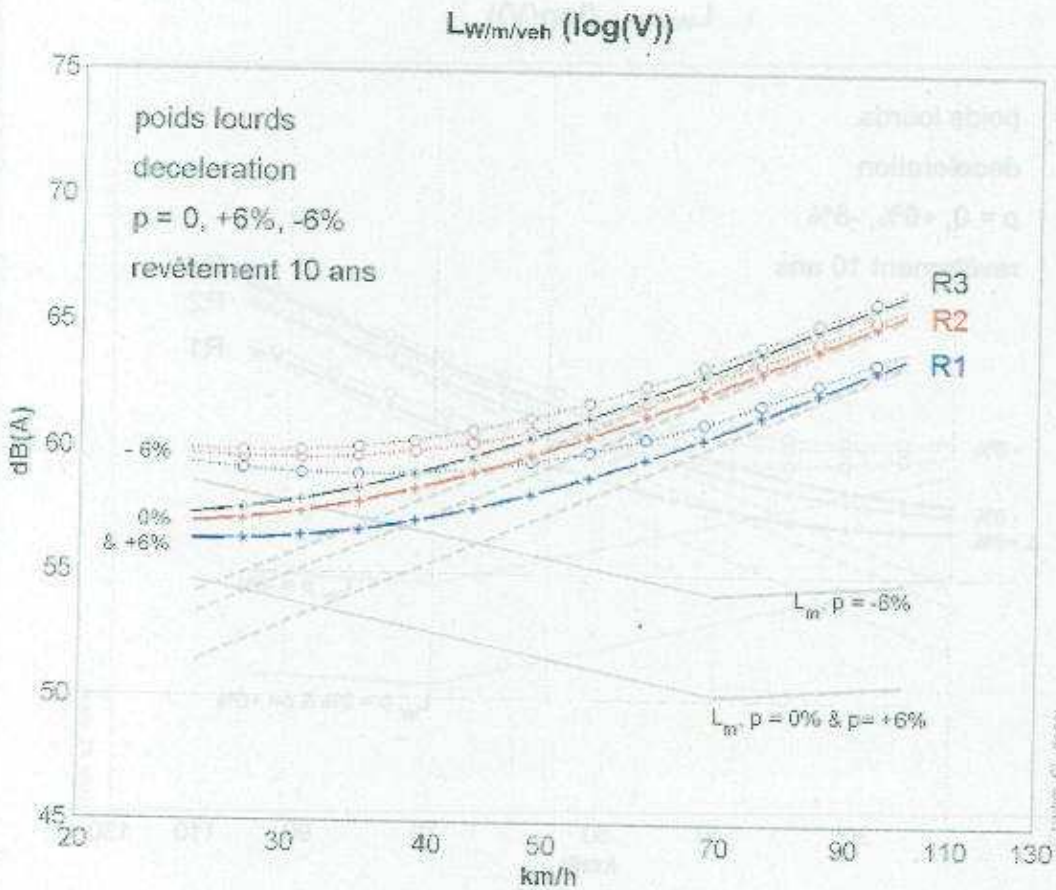
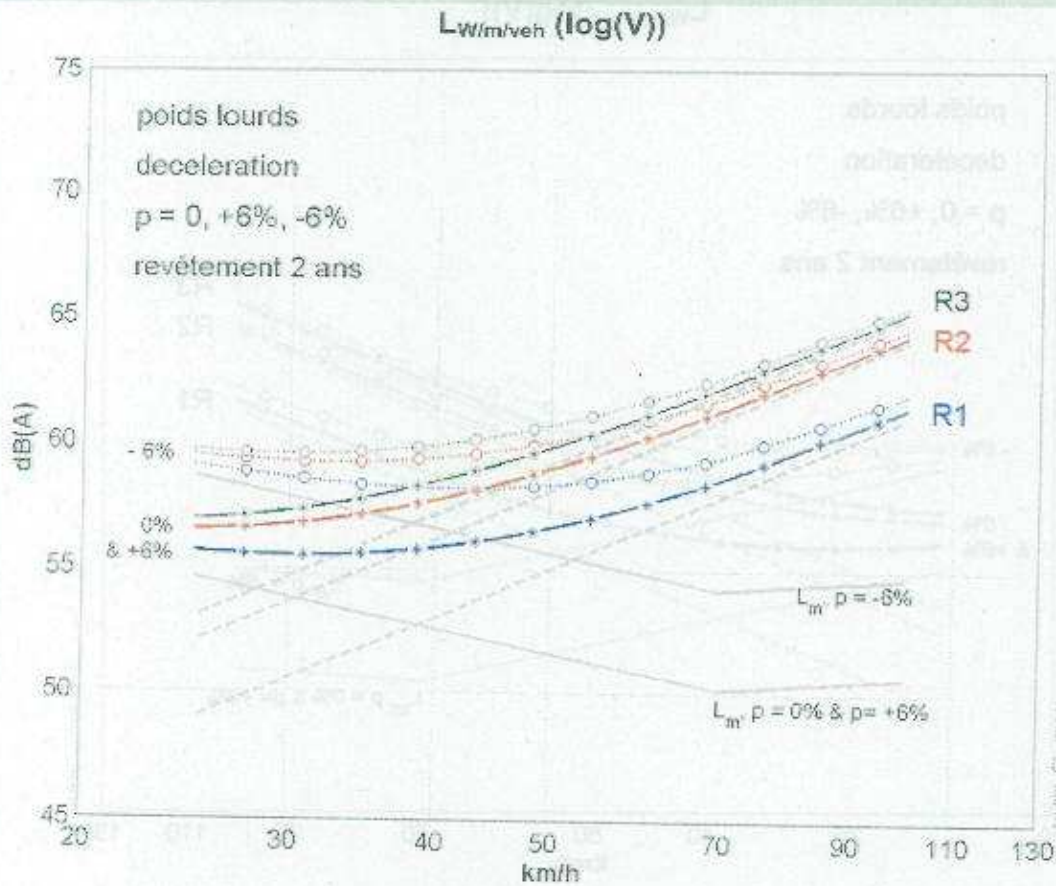
Graphes LW/m/veh - PL, allure stabilisée (Figures B)



Graphes LW/m/veh - PL, accélération (Figures C)



Graphes LW/m/veh - PL, décélération (Figures D)



Graphes LW/m/veh - PL, décélération (Figures D)

