

Etat des lieux des performances acoustiques des revêtements de chaussées



Dossier technique et pédagogique

**Date de publication :
Décembre 2011**

Remerciements :

à Luc GOUBERT du Centre de Recherches Routières (belge) (CRR), à Didier CARRE du Groupement Professionnel des Bitumes (GPB), à Thierry DUSSAUTOIR du Conseil Général des Hauts-de-Seine, au Groupe Acoustique du Laboratoire Régional des Ponts et Chaussée de Strasbourg, au département Bruit de l'Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement (IBGE), à la Communauté Urbaine de Lille Métropole, à Acoucity Observatoire de l'environnement sonore du Grand Lyon, à l'Union Routière de France (URF), à l'Union des Syndicats de l'industrie Routière Française (USIRF), pour leur participation à la construction de ce document à travers leur expertise, leurs témoignages ou la mise à disposition de leurs ressources documentaires.

Sommaire

Introduction	5
1. Eléments préliminaires	6
1.1. Typologie des véhicules motorisés.....	6
1.1.1. Véhicules légers (VL).....	7
1.1.2. Poids lourds (PL).....	7
1.1.3. Deux roues motorisées.....	8
1.2. Principales sources de bruit d'un véhicule motorisé.....	9
1.2.1. Bruit moteur.....	9
1.2.2. Bruit de contact pneumatique-chaussée.....	10
1.2.3. Bruit aérodynamique.....	10
1.2.4. Bruit rayonné par les vibrations et chocs de composants du véhicule.....	10
1.2.5. Prédominance du bruit de roulement.....	11
1.3. Bruit de contact pneumatique / chaussée.....	15
1.3.1. Vibration des pneumatiques.....	15
1.3.2. Air pumping (pompage d'air).....	16
1.3.3. Rayonnement sonore par effet dièdre (ou effet de corne).....	17
1.3.4. Propagation du bruit.....	18
1.3.5. Absorption du bruit.....	19
1.3.6. Effets non exclusifs au revêtement de chaussée.....	21
1.3.7. Synthèse.....	22
1.4. Caractéristiques du revêtement influant sur le bruit de contact pneumatique / chaussée.....	23
1.4.1. Revêtement de chaussée classique.....	23
1.4.2. Irrégularités de surface.....	24
1.4.3. Porosité.....	30
1.4.4. Comportement viscoélastique.....	31
1.4.5. Revêtement mouillé.....	32
2. Evolution des revêtements de chaussée	33
2.1. Eléments d'amélioration des performances acoustiques.....	35
2.1.1. Teneur en vide et discontinuité granulaire.....	36
2.1.2. Réduction de la taille des granulats.....	38
2.1.3. Intégration d'élastomères.....	39
2.1.4. Gains escomptés.....	39

2.1.5. Constitution d'un revêtement de chaussée "silencieux"	41
2.2. Les différentes technologies.....	43
2.2.1. Revêtements de chaussées classiques	43
2.2.2. Le SMA.....	48
2.2.3. Bétons bitumineux drainants (BBDr).....	49
2.2.4. Bétons bitumineux minces (BBM), très minces (BBTM) et ultra minces BBUM	53
2.2.5. Enrobés de dernière génération	56
2.2.6. Futurs revêtements de chaussée "silencieux"	57
2.3. Mise en œuvre, maintenance et coût	58
2.3.1. Mise en œuvre	58
2.3.2. Maintenance	59
2.3.3. Coût d'un revêtement de chaussée "silencieux"	63
2.4. Performances acoustiques	65
2.4.1. Méthodes d'évaluation	65
2.4.2. Niveaux de bruit mesurés.....	69
2.4.3. Modèles de prédiction	72
2.4.4. Performances en fonction de la vitesse	75
2.5. Vieillesse.....	78
2.5.1. Dégradation mécanique	79
2.5.2. Dégradation des performances acoustiques.....	81
3. Choisir un revêtement de chaussée "silencieux"	86
3.1. Produits les plus courants sur le marché.....	87
3.2. Performances affichées	88
3.3. Prise en compte des conditions de circulation.....	89
3.4. Prise en compte des conditions climatiques	89
3.5. Retour d'expériences.....	90
3.5.1. Projet européen SILVIA	90
3.5.2. Programme de recherche "Revêtements de routes peu bruyants à l'intérieur des localités"	93
3.5.3. Communauté Urbaine de Lille Métropole	102
3.5.4. Expérience du Conseil Général des Hauts-de-Seine (CG92).....	102
3.5.5. Synthèse	108
3.6. Attentes des collectivités territoriales.....	110
Conclusion	111
Documents de référence	112

Introduction

Les avancées technologiques de ces dernières années en termes de conception de revêtements de chaussées dits "silencieux"¹ ou "acoustiques" permettent aujourd'hui d'offrir aux gestionnaires d'infrastructures une solution efficace de réduction du bruit du trafic routier. Si les performances affichées par les fabricants semblent séduisantes, certaines interrogations subsistent pour les décideurs locaux en charge des transports et de l'environnement. Les principaux points d'éclairage attendus concernent : le surcoût potentiel, la compatibilité des performances annoncées avec les conditions de trafic, les performances sur chaussée humide, le vieillissement et la durée de vie, la résistance aux conditions climatiques, les difficultés de mise en œuvre et de maintenance... De nombreuses précisions techniques sont attendues.

- *Quelles sont les différences entre un revêtement de chaussée "silencieux" et un revêtement "classique" ?*
- *A quelles vitesses et densités de trafic sont-ils performants ?*
- *Leur efficacité est-elle identique pour les véhicules légers, les poids lourds ou les véhicules deux roues motorisés ?*
- *Quelle est la part de contribution du revêtement de chaussée sur le bruit total émis par les véhicules en roulement ?*
- *A-t-il un effet de réduction sur le bruit moteur ?*
- *Quels sont les produits sur le marché et leurs spécificités ?*
- *Quelles sont leurs limites d'utilisation ?*
- *Quelles sont les pratiques à l'étranger ?*
- *Quels sont les produits du futur ?*
- *Y a-t-il des retours d'expérience significatifs ?*
- *Le gain de bruit escompté ne se fait-il pas au détriment des performances mécaniques, en particulier l'adhérence ou un vieillissement accéléré ?*
- *Comment s'opère la maintenance ?*
- *Si l'on analyse les avantages et les inconvénients potentiels, gagne-t-on beaucoup à privilégier la mise en œuvre de revêtements de chaussées "silencieux" par rapport à une solution classique ?*

Ce document s'adresse principalement aux responsables des collectivités territoriales en charge de la mise en place des plans de prévention du bruit dans l'environnement (PPBE). Il a pour objectif majeur d'apporter des réponses à leurs interrogations sur le recours à des revêtements de chaussées "silencieux" à travers une présentation simplifiée des aspects techniques et la mise à disposition d'exemples concrets d'expériences de mise en œuvre. Il est construit en 3 parties :

- une partie pédagogique présentant des éléments préliminaires indispensables à la compréhension des aspects techniques du document (cf. §1),
- une partie répertoriant l'évolution des performances des revêtements dits "silencieux" (cf. §2),
- une troisième partie consacrée aux retours d'expériences (cf. §3) et à des conseils pour guider le choix d'un revêtement "silencieux".

Précisons que ce document a été élaboré essentiellement à partir de références bibliographiques. Les principaux éléments exploités dans la rédaction de ce rapport sont extraits des travaux des

¹ Dans leur ouvrage de base, Sandberg et Ejsmont définissent un "revêtement silencieux" comme un revêtement de chaussée qui, lorsqu'on fait rouler un pneumatique dessus, génère un bruit inférieur d'au moins 3 dB(A) à celui des types de revêtements usuels [6].

organismes ou programmes de recherches suivants : Belgian Road Research Centre, SILVIA, IBGE, OFROU/OFEV, LCPC, SETRA, SCREG, LCPC-COLAS, Communauté Urbaine de Lille Métropole, DIT/DEGD du Conseil Général des Hauts-de-Seine, IPG, SILENCE, ERA-NET ROAD, PERSUADE, M+P consulting engineers, Working Group Noise Eurocities... L'ensemble des ressources bibliographiques est fourni à la fin de ce document.

1. Eléments préliminaires

Ce chapitre propose en préambule un rappel sur la typologie des véhicules motorisés (cf. §1.1), puis sur les principales sources de bruit d'un véhicule en circulation (cf. §1.2), parmi lesquelles figure le bruit de contact pneumatique / chaussée. Cette source de bruit particulière est explicitée de façon détaillée au §1.3. Une partie de ce chapitre est également consacrée à la description succincte des différentes couches composant un revêtement de chaussée et des caractéristiques du revêtement influant sur le bruit de contact pneumatique / chaussée (cf. §1.4). Cette première partie du document reprend de nombreux extraits du document de l'IBGE consacré aux revêtements routiers [1].

1.1. Typologie des véhicules motorisés

Selon le Comité des constructeurs français d'automobiles, le parc roulant comptait dans l'Hexagone 37 438 000 véhicules tous genres confondus. On distingue 31,05 millions de voitures particulières, 5,76 millions de véhicules utilitaires légers, et 628 000 véhicules industriels de plus de 5 tonnes. Les deux-roues à moteur représenteraient environ 3,5 millions de véhicules supplémentaires [51].

Le bruit routier est le fruit de l'accumulation des émissions sonores de tous les véhicules motorisés dans le flux de la circulation. On distingue différents types de véhicules motorisés. De manière simplifiée, 3 catégories sont définies de la façon suivante :

- la catégorie des véhicules légers (VL) constituée essentiellement de voitures particulières et de véhicules utilitaires légers (VUL),
- la catégorie des poids lourds (PL) constituée par les camions de transport de marchandises et les bus de transport public,
- les deux roues motorisés (tout véhicule ayant 2 ou 3 pneumatiques dont le compartiment conducteur et/ou passager est à ciel ouvert).

En France, le nouveau guide de "Prévision du bruit routier" du SETRA [5] restreint la modélisation à deux catégories de véhicules : les VL dont le poids total en charge (PTAC) est inférieur à 3,5 T et les PL dont le PTAC est supérieur ou égal à 3,5 T. Les autres véhicules que les VL et les PL sont assimilés à l'une de ces catégories : les deux roues motorisés aux VL et les autobus aux PL...²

A l'étranger, mais également pour certaines études en France, on sépare les poids lourds en 3 classes :

- les poids lourds (PL), véhicule de transport de marchandises à 2 essieux et 6 pneumatiques, en général d'un poids total entre 4,5 T et 12 T ("*Medium Trucks*"),
- les trains routiers (TR), véhicule de transport de marchandises de plus de 2 essieux, en général d'un poids supérieur à 12 T ("*Heavy Trucks*"),
- les autobus (B), tout véhicule à 2 ou 3 essieux conçu pour transporter 9 passagers ou plus (pas d'indication du poids total).

² Dans la quasi-totalité des cas, les autres véhicules que les VL et les PL ne sont pas pris en compte indépendamment du fait de la quantité restreinte de données fiables sur leur trafic (mesures ou prévision).

Cette distinction des véhicules en catégorie n'est pas anodine en termes d'émission sonore des véhicules. En effet, le niveau de bruit émis est étroitement lié à la masse et à la vitesse de déplacement du véhicule. L'augmentation de ces deux facteurs entraîne une augmentation des émissions sonores. La figure 1.1 extraite des travaux de Sandberg & Ejsmont [6] illustre ce propos.

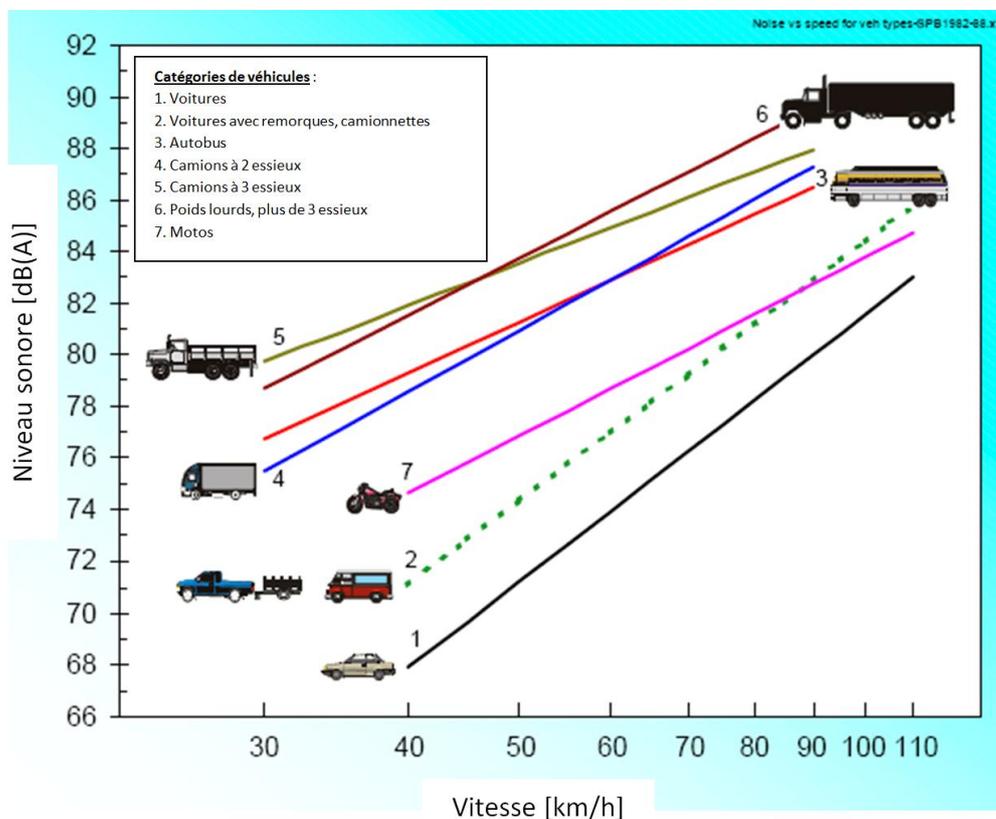


Figure 1.1 : Niveau de bruit des différentes catégories de véhicules en fonction de la vitesse de déplacement, Sandberg & Ejsmont, 2002, [6].

1.1.1. Véhicules légers (VL)

Les véhicules légers constituent la part principale des véhicules en circulation sur les routes hors agglomération et en agglomération.

1.1.2. Poids lourds (PL)

Certains axes de liaison entre les grandes agglomérations européennes concentrent une proportion importante de poids lourds dans certaines périodes (>20%).

Il existe au niveau européen comme en France des bases de données d'émission des PL et VL pour modéliser le bruit de ces types de véhicules. Au niveau européen, les modèles prévisionnels simplifiés du bruit des véhicules intègrent les dernières évolutions technologiques.

Le rapport d'émission entre un véhicule léger et un poids lourd dépend non seulement de la vitesse du véhicule, mais aussi de la rampe de la voie de circulation. Dans Le modèle théorique simplifié proposé par le centre de recherche belge sur le bruit des routes [7] et présenté au §1.2.5 de ce document, le bruit produit par un PL est beaucoup plus important que celui d'un VL. La différence est de l'ordre de 10 dB(A) quelle que soit la vitesse. Cette différence par rapport au VL résulte de la masse plus élevée des PL qui exige à la fois :

- plus de puissance "moteur",
- et plus de surface du pneumatique en contact avec la chaussée.

Sur une autoroute, un poids lourd représente acoustiquement 4 véhicules légers (ce qui signifie que 20% de poids lourds émettent autant de bruit que les 80% de véhicules légers). Ce rapport peut atteindre 10 en milieu urbain (les 10% de poids lourds émettent alors autant de bruit que les 90% de véhicules légers).

1.1.3. Deux roues motorisés

Les véhicules deux roues motorisés constituent une alternative pour éviter les congestions du trafic pour des déplacements urbains. Ils sont de plus en plus utilisés dans les grandes agglomérations.

Pour ce type de véhicules, quel que soit le régime moteur, la source prédominante du bruit reste le groupe "motopropulseur".

Le mode de propulsion joue un rôle primordial en termes d'émission sonore. La réglementation actuelle admet que les véhicules deux roues motorisés sont de 3 à 6 dB(A) suivant la cylindrée plus bruyants que les véhicules légers³. Contrairement aux autres véhicules, il n'existe pas pour le moment de bases de données d'émissions acoustiques. En Europe comme en France, les moyens de réduire le bruit de ce type de véhicules portent sur des évolutions technologiques du groupe motopropulseur (moteur hybride, moteur électrique). Il est également possible d'adopter des valeurs d'homologations plus restrictives et de développer des actions de sensibilisation auprès des conducteurs afin que ceux-ci veillent à :

- utiliser des pots d'échappement réglementaires,
- bien entretenir leur véhicule,
- choisir des régimes moteurs "moins bruit",
- adapter leur conduite en ville (limitation des phases d'accélération rapide).

³ Pour les deux roues motorisées la limite d'homologation est comprise entre 75 et 80 dB(A) en fonction de l'âge et de la cylindrée du véhicule. Elle est comprise entre 77 et 80 dB(A) pour les deux roues motorisées de plus de 80 cm³ (EU Directive 97/24/EC). Pour les VL la limite d'homologation est de 74 dB(A) (EU Directive 70/157/EEC).

1.2. Principales sources de bruit d'un véhicule motorisé

Les sources de bruit d'un véhicule peuvent être classées suivant deux grandes familles : les sources de bruit commandées par le régime moteur et les sources de bruit commandées par la vitesse de circulation. Il en résulte un bruit composé par plusieurs sources sonores qui se combinent (cf. tableau 1.1 et figure 1.2). La prédominance d'une source par rapport aux autres est étroitement liée à la vitesse de déplacement du véhicule.

Source de bruit	Type de source de bruit	Commentaires
Bruit moteur	Source de bruit liée au régime moteur	Le bruit provenant de ces sources est souvent dénommé "bruit du groupe motopropulseur" ou "bruit de propulsion".
Bruit de contact pneumatique/chaussée	Source de bruit liée à la vitesse	Le bruit de ces sources est appelé "bruit de roulement".
Bruit rayonné par les vibrations et chocs de composants du véhicule		
Bruit aérodynamique		

Tableau 1.1 : Principales sources de bruit d'un véhicule motorisé.

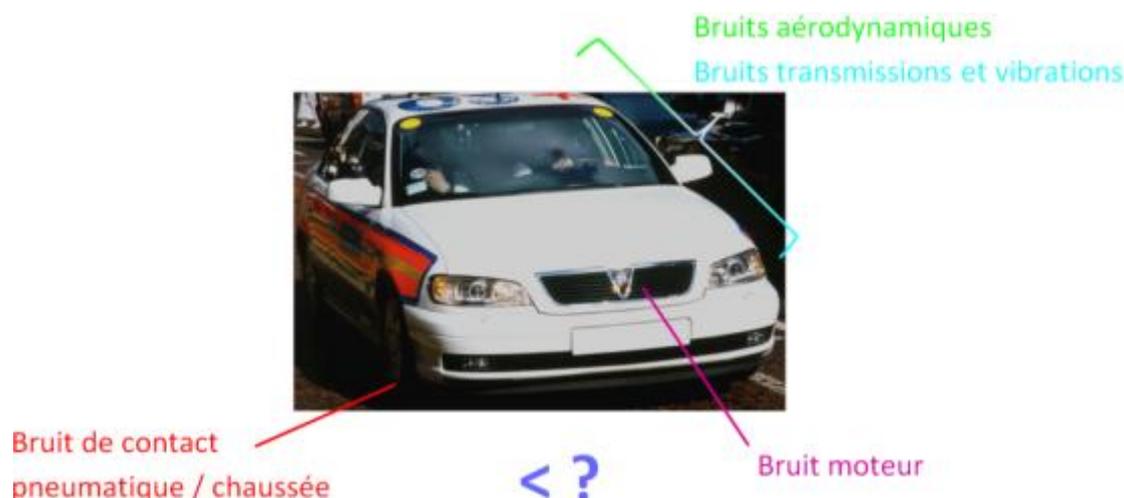


Figure 1.2 : Sources de bruit d'un véhicule motorisé.

1.2.1. Bruit moteur

Cette source de bruit est liée au régime moteur du véhicule. Elle comprend :

- l'unité de puissance (moteur, entrée d'air et échappement),
- le ventilateur de refroidissement et la transmission (boîte de vitesses et à l'arrière essieu).

A titre illustratif, la figure 1.3 présente le niveau de bruit émis par un véhicule motorisé en fonction du régime moteur.

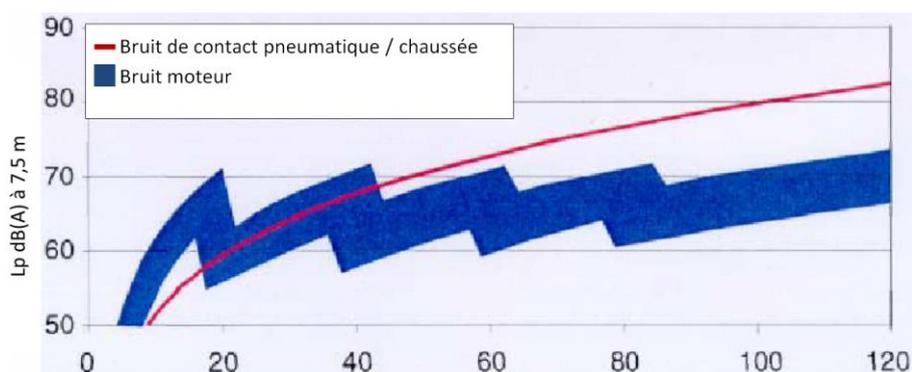


Figure 1.3 : Bruit moteur en fonction du régime moteur, discontinuités liées aux changements de rapports, [1].

Au cours des 20 dernières années, les constructeurs de véhicules sont parvenus à diminuer considérablement le bruit motopropulseur : moteur, échappement et transmission pour les voitures et les camions. Ces améliorations sont particulièrement importantes pour les camions. Ces progrès ont été réalisés conformément aux exigences croissantes de la réglementation européenne qui fixe des valeurs seuils d'émission du bruit pour un véhicule lors de son homologation pour être commercialisée sur le marché européen.

1.2.2. Bruit de contact pneumatique-chaussée

Cette source de bruit est liée à la vitesse de circulation du véhicule. Elle dépend :

- du type de pneumatique (matière, structure, dessin, largeur, pression de gonflage...),
- de la texture de la surface de la chaussée,
- de la capacité d'absorption acoustique de la chaussée.

En France, pour des vitesses de circulation supérieures à 30 km/h pour les véhicules légers et 40-60 km/h pour les poids lourds, le bruit émis par le contact entre le pneumatique et la chaussée est considéré comme la source de bruit prédominante du véhicule. Les différentes composantes du bruit de contact pneumatique / chaussée sont détaillées au §1.3 de ce document.

1.2.3. Bruit aérodynamique

Le bruit aérodynamique est dû à la turbulence de l'air. Aux vitesses de circulation usuelles des véhicules, le bruit aérodynamique reste relativement faible par rapport aux autres sources de bruit du véhicule.

1.2.4. Bruit rayonné par les vibrations et chocs de composants du véhicule

Les vibrations et entrechoquements de divers éléments (caisse, etc.) dus aux défauts de la chaussée, en particulier pour les poids lourds engendrent le rayonnement acoustique de la structure du véhicule.

1.2.5. Prédominance du bruit de roulement

Le bruit provoqué par un véhicule est la sommation énergétique des différentes contributions sonores. Si le bruit du véhicule augmente avec la vitesse du véhicule, l'importance de la contribution de chacune des deux grandes familles de sources de bruit du véhicule dépend du type de véhicule et de sa vitesse mais aussi des régimes moteurs utilisés en particulier dans les faibles vitesses (< 50 km/h). Le bruit de roulement augmente avec la vitesse et devient prépondérant à partir de 50 km/h pour l'ensemble du parc des VL. Pour des vitesses inférieures à 50 km/h, des régimes moteurs importants peuvent néanmoins produire des niveaux sonores très élevés⁴. La figure 1.4 illustre ce propos.

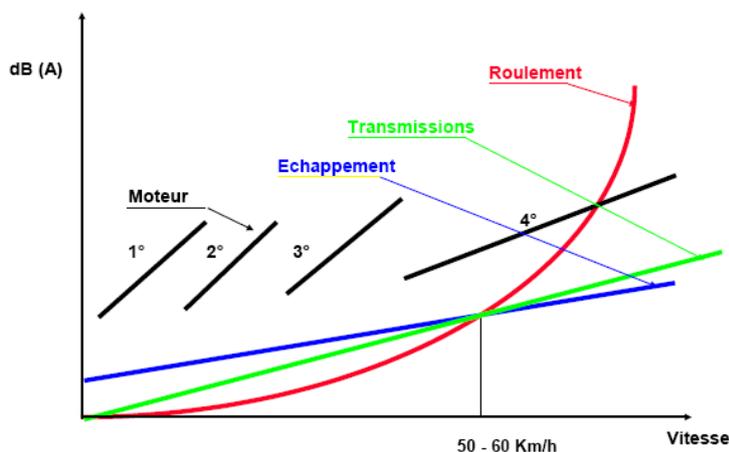


Figure 1.4 : Sources de bruit VL (source : CERTU).

Toutefois, sur les nouveaux véhicules, les constructeurs sont parvenus à diminuer considérablement le bruit émis par le groupe motopropulseur. De ce fait, le bruit de contact pneumatique / chaussée devient prédominant pour des vitesses dès 30-40 km/h pour les VL et dès 50-60 km/h pour les PL. Le modèle prévisionnel simplifié mis en œuvre aux Pays-Bas [8] pour la prévision du bruit routier VL et PL illustre ce propos (cf. figure 1.5).

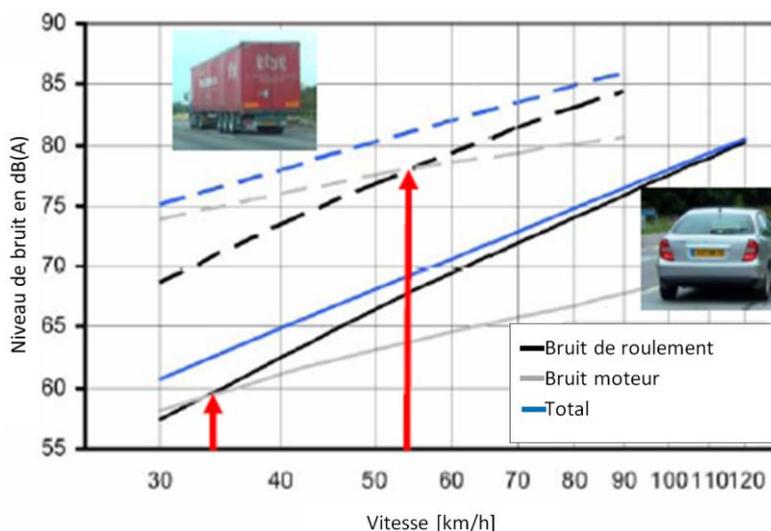


Figure 1.5 : Contribution du bruit du moteur et du bruit de roulement, (VL et PL), Luc Goubert, [7].

⁴ À faible vitesse notamment en phase d'accélération ou de décélération, la responsabilité du conducteur dans la production du bruit de son véhicule est importante à travers le choix de son régime moteur. Il est à noter qu'en Suisse les opérations « ECO conduite » pour réduire la consommation dans les déplacements sont aussi valorisées par les impacts positifs de cette nouvelle façon de conduire pour réduire le bruit du véhicule. En milieu urbain pour des vitesses limitées à 50 km/h, des actions de sensibilisation et de responsabilisation des conducteurs peuvent s'avérer pertinentes.

Dans ce modèle théorique simplifié, le bruit de roulement devient dominant par rapport au bruit du moteur pour des vitesses :

- à partir de 35 km/h pour les véhicules légers (trait plein),
- et à partir de 55 km/h pour les véhicules lourds (trait pointillée).

Le bruit de roulement augmente avec la vitesse de manière plus prépondérante que le bruit du groupe motopropulseur. Pour les véhicules légers, si à grande vitesse, la contribution déterminante du bruit de roulement au bruit routier était un phénomène déjà connu, sa présence importante dans le domaine des vitesses de circulation en environnement urbain (< 50 km/h) ouvre de nouvelles perspectives d'actions. Dans ce cadre, au niveau européen, il est considéré comme possible d'agir contre le bruit des véhicules légers en contexte urbain en agissant sur le bruit de roulement, par action sur les caractéristiques du pneumatique et du revêtement de chaussée.

Pour aller plus loin, le programme de recherche néerlandais IPG [8] a simulé la suppression du bruit moteur ou du bruit de roulement. Ces simulations présentent un intérêt majeur dans le cadre de la réflexion autour des véhicules à moteur électrique. L'utilisation du moteur électrique correspond pratiquement à faire disparaître la source de bruit "motopropulseur" (il ne subsiste plus que les bruits émanant de divers pompes, assistance et freinage). Le tableau 1.2 présente les gains théoriques résultant de la suppression du bruit de contact pneumatique / chaussée. Ces gains s'avèrent : plus importants que ceux associés à la suppression du bruit moteur et valables pour la majeure partie du domaine de vitesses (-5 à -10 d(A) pour les VL, -3 à -5 dB(A) pour les PL). Sur les plages de vitesse où le bruit de roulement est prédominant, les travaux d'IPG mettent ainsi en évidence le potentiel de réduction significative du bruit routier à travers des actions ciblées sur le bruit de contact pneumatique / chaussée.

Type de véhicule	Réduction théorique du niveau de bruit global [dB(A)]		
	Vitesse [km/h]	Bruit "moteur" absent	Bruit de contact pneumatique / chaussée absent
Véhicule léger (VL)	50 km/h	-2 dB(A)	-5 dB(A)
	80 km/h	-1 dB(A)	-8 dB(A)
	110 km/h	0 dB(A)	-10 dB(A)
Poids lourd (PL)	50 km/h	-3 dB(A)	-3 dB(A)
	80 km/h	-2 dB(A)	-5 dB(A)

Tableau 1.2 : Réduction théorique du bruit d'un véhicule par suppression de l'une des deux sources principales, IPG [8].

Il semble par conséquent potentiellement intéressant d'agir sur le bruit de contact pneumatique / chaussée autant en environnement urbain avec des vitesses limitées que sur des axes circulés à grande vitesse. Le recours à des revêtements de chaussées silencieux présente ce de fait un intérêt majeur. A titre illustratif, le tableau 1.3 présente brièvement les pistes de réduction du bruit des principales sources de bruit des VL.

Vitesse VL	Source(s) dominante du bruit du véhicule	Moyens d'actions
< 30 km/h	Bruit du groupe motopropulseur	Gestion des accélérations et régime "moteur" par le conducteur
		Moteur hybride
		Moteur électrique
> 30 km/h et < 50 km/h	Bruit de contact pneumatique / chaussée et bruit du groupe motopropulseur	Pneumatique plus silencieux
		Revêtement de chaussée plus silencieux
		Comportement du conducteur
		Moteur hybride
> 50 km/h	Bruit de contact pneumatique / chaussée	Pneumatique plus silencieux
		Revêtements de chaussée silencieux (impact accru pour les véhicules électriques)

Tableau 1.3 : Moyens de réduction du bruit d'un véhicule motorisé.

En milieu urbain pour les poids lourds (PL), dans un registre de vitesse limitée à 50 km/h les revêtements routiers acoustiques sont moins efficaces. En Suisse, la prise en compte de cette réalité a amené, l'équipe de recherches "OFROU" à orienter ses travaux sur les revêtements silencieux en milieu urbain. Depuis 2003 le postulat suivant est appliqué : *"Le développement des revêtements peu bruyants dans les localités doit avant tout être optimisé en fonction des automobiles (VL), car le bruit de moteur domine sur le bruit de roulement chez les poids lourds (PL) dans ces registres de vitesses"*.

Dans son rapport l'organisme de recherche néerlandais TNO [27] synthétise la prédominance des différentes sources du bruit routier fonction de la vitesse, de l'allure, du type de réseau et du poids du véhicule (cf. tableau 1.4).

Type de réseau routier →	Résidentiel (ville/banlieue)	Résidentiel (ville/banlieue)	Routes principales (ville/banlieue)	Routes principales (ville/banlieue)	Grandes artères (ville/banlieue)	Autoroutes urbaines (ville/banlieue)	Autoroutes hors agglomération	Routes hors agglomération	Total
Type d'allure	Saccadée	Fluide	Saccadée	Fluide	Fluide	Fluide	Fluide	Fluide	
Catégorie de vitesse	V<50	V<50	V<50	V<50	50<V<70	70<V<120	80<V<130	50<V<100	
Longueur totale de routes (km)	547 998	1 112 603	83 030	168 576	100 643	5 032	95 610	2 918 633	5 032 125
Pourcentage du réseau routier total	11%	22%	2%	3%	2%	0,1%	2%	58%	100%
Longueur de routes sélectionnées (km)	356 199	723 192	66 424	134 861	90 578	4 026	47 805	1 459 316	282 401
Pourcentage du réseau routier sélectionné	12%	25%	2%	5%	3%	0,1%	2%	51%	100%
Nombre moyen d'habitants exposés	250	250	500	500	500	1000	50	20	
Distance moyenne jusqu'à la route (m)	15	15	15	15	15	50	50	50	
Pénalité appliquée	3	0	3	0	0	0	0	0	
Sources de bruit									
	moteur, roulement	roulement, moteur	moteur, roulement	roulement, moteur	roulement	roulement	roulement	roulement	
	moteur	moteur, roulement	moteur	moteur, roulement	moteur, roulement	moteur, roulement	moteur, roulement	moteur, roulement	

Tableau 1.4 : Importance des différentes sources du bruit routier en fonction de la vitesse, de l'allure, du type de réseau et du poids du véhicule, TNO (Pays-Bas) [27].

1.3. Bruit de contact pneumatique / chaussée

Pour réduire considérablement le bruit de roulement, prédominant en milieu urbain dès 30-40 km/h pour les VL et 50-60 km/h pour les PL, il apparaît nécessaire de comprendre les mécanismes physiques en jeu dans l'établissement du bruit de contact pneumatique / chaussée. On distingue différents phénomènes à l'origine de la génération du bruit de contact pneumatique / chaussée, tels que la vibration des pneumatiques, le pompage d'air ("*air pumping*"), l'effet dièdre ou effet de corne (cf. §1.3.1 à §1.3.3). Les principaux mécanismes entrant dans la propagation du bruit (cf. §1.3.4), en particulier les phénomènes d'absorption acoustique sont également explicités au §1.3.5.

La diminution du bruit liée au choix du revêtement constitue le point essentiel de ce rapport. Dans la mesure où ceux-ci sont également impliqués dans la genèse du bruit, certains paramètres indépendants des caractéristiques propres du revêtement sont également brièvement commentés, tels que la projection de gouttelettes d'eau, le rôle du pneumatique, ou le comportement de conduite individuel (cf. §1.3.6).

1.3.1. Vibration des pneumatiques

Lorsque le pneumatique roule sur une surface qui n'est pas parfaitement lisse, les irrégularités entraînent des vibrations de la bande de roulement et indirectement des flancs du pneumatique. Le rayonnement acoustique de ces vibrations contribue significativement à la production du bruit de contact pneumatique / chaussée. Ce facteur est d'autant plus important que la route est irrégulière ou que le revêtement est rugueux (cf. figure 1.6 à 1.8).



Figure 1.6 : Bruit dû aux vibrations du pneumatique (source : COLAS).

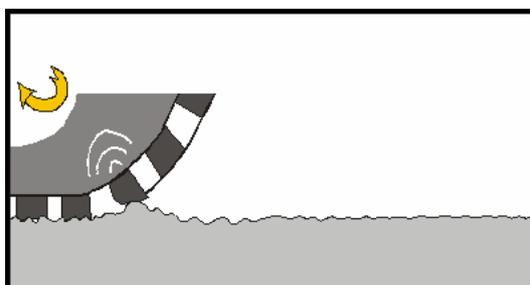


Figure 1.7 : Bruit dû aux vibrations du pneumatique, Luc Goubert [7].

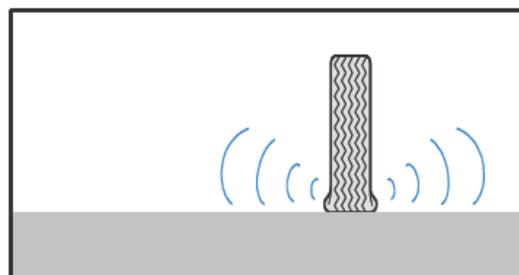


Figure 1.8 : Bruit dû aux vibrations du pneumatique, Luc Goubert [7].

Toutefois, seules les irrégularités suffisamment profondes et larges (taille horizontale supérieure à 1,5 à 2 cm typiquement) causent des vibrations, celles inférieures à 1-1,5 cm n'en causent pratiquement aucune et sont plutôt favorables (suppriment le pompage d'air). Les vibrations des pneumatiques sont maximales lorsque le revêtement routier présente de grandes irrégularités (5 à 10 cm), ce qui correspond approximativement à la surface de contact avec le pneumatique. Pour cette gamme d'irrégularité, il importe de souligner que les vibrations du pneumatique font vibrer les parois et le volume d'air de l'habitacle *via* la suspension du véhicule. D'un point de vue acoustique, les revêtements de type pavés ou dalles entrent dans cette catégorie et sont donc à éviter. Ils sont connus pour générer un bruit supérieur d'au moins 6 dB(A) par rapport à celui d'un revêtement classique.

Les erreurs commises lors de la construction du revêtement peuvent aussi être à l'origine de méga-irrégularités. Les ondulations assez fréquentes sur les surfaces en béton sont dues au mauvais lissage du béton encore humide et constituent un exemple type. Les méga-irrégularités peuvent également apparaître par des phénomènes d'usure : creux, fissures... Par ailleurs, la réduction du calibre du granulats du revêtement permet de réduire la taille horizontale des irrégularités. La forme du relief de surface joue également un rôle important : une surface qui présente des irrégularités en forme de creux (surface compactée) générera moins de vibrations qu'une surface dont les irrégularités sont en forme de bosses.

Les vibrations des pneumatiques génèrent du bruit dans la gamme des basses fréquences (de l'ordre de 80 à 1250 Hz) en fonction de la vitesse du véhicule et de son poids. Le bruit perçu à l'intérieur de la voiture est donc largement impacté par la présence de méga-irrégularités.

D'autres effets liés à l'interaction entre les pneumatiques et la surface de la chaussée peuvent avoir lieu, mais ils sont de moindre importance. La succession de phénomènes d'adhésion - rupture d'adhésion entre la gomme et les granulats au niveau de la zone de contact crée des bruits hautes fréquences (crissements) encore désignés sous le vocable "*slip and stick*" (adhérence-glisement et adhérence-décollement). Il s'agit de phénomènes liés aux secousses des éléments de profil du pneumatique qui peuvent se manifester par des sons émis dans des fréquences plutôt élevées (supérieures à 1250 Hz) et, dans le cas extrême, sous la forme d'un "crissement" dans les virages. A mentionner également le phénomène de "*stick-snap*" correspondant à des émissions de sons assez aigus (fréquences supérieures à 1250 Hz) qui apparaissent lorsque l'adhésion est trop forte entre le pneu et la chaussée (cas par exemple des crissements qui surviennent lorsqu'on roule dans un parking).

Outre les vibrations du pneumatique, un autre phénomène constitué par les bruits de chocs directs entre les sculptures du pneumatique et les agrégats du revêtement participe au bruit de contact pneumatique / chaussée.

1.3.2. Air pumping (pompage d'air)

Un pneumatique qui roule sur une surface produit du bruit lié au phénomène de compression puis de détente soudaine de l'air situé entre les pneumatiques et les espaces vides non communicants de la chaussée. Le phénomène d'"*air pumping*", dominant pour l'émission sonore dans le domaine des hautes fréquences (1 à 5 kHz environ), est d'autant plus important que la surface de contact entre le pneumatique et la chaussée est importante. Ce phénomène n'est pas observé - ou est largement atténué - sur une surface qui présente des aspérités de petites dimensions (inférieures à 1 cm typiquement), ou une bonne porosité qui vont faciliter la circulation de l'air (cf. figures 1.9 et 1.10).



L'air présent dans les reliefs des pneumatiques peut alors librement s'échapper, au moment du contact avec la chaussée, entre les aspérités ou les vides limitant ainsi le phénomène de compression, puis être ré-aspiré moins brusquement à l'arrière de la zone de contact, limitant alors le phénomène de détente.

Figure 1.9 : Bruit dû au phénomène d'air pumping (source : COLAS).

Les aspérités de petite dimension s'obtiennent généralement en utilisant de petits granulats à la surface (enrobés à faible granulométrie par exemple). Elles doivent être homogènes (éviter les amas de granulats) mais ne peuvent pas former de motif régulier (pas de rainures situées à égale distance les unes des autres) qui produirait alors un sifflement. Il convient généralement d'avoir des aspérités suffisamment profondes (au minimum 0,5 mm de profondeur de texture) réparties de façon homogène dans une trame dense et de granulométrie petite à moyenne (maximum 10 mm). La porosité est quant à elle liée à la présence de trous en surface communicants avec les vides présents dans la structure du revêtement (minimum de 15 à 20 % de vides : enrobés drainants par exemple).

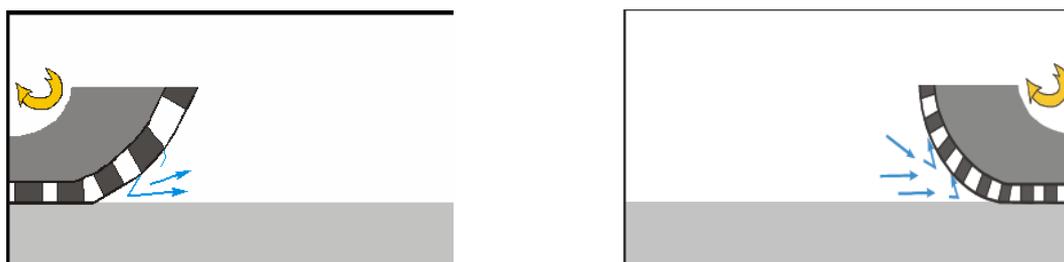


Figure 1.10 : Bruit dû au phénomène d'air pumping, Luc Goubert [7].

1.3.3. Rayonnement sonore par effet dièdre (ou effet de corne)

Ce mécanisme ne provoque pas de bruit en soi, mais amplifie le bruit généré par les autres phénomènes. Le son peut être répercuté plusieurs fois dans la corne d'air (ou dièdre) formé par le pneumatique et le revêtement routier, ce qui a pour effet de l'intensifier (cf. figures 1.11 et 1.12). Le principe est le même que celui d'un mégaphone. L'amplification a lieu principalement dans la gamme des fréquences les plus audibles (1 à 3 kHz). Il s'agit de réflexions successives de l'onde sonore dans le dièdre formé par le pneumatique et la surface de la chaussée sur des revêtements fermés à l'avant et à l'arrière de la roue. Sur les revêtements ouverts ou drainants, l'absorption acoustique due aux vides entraîne une diminution de cet effet d'amplification.

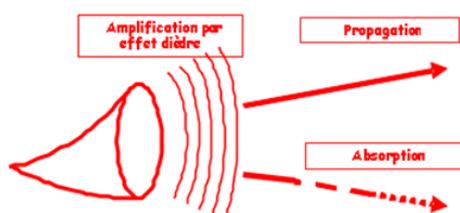


Figure 1.11 : Rayonnement sonore par effet dièdre, (source : COLAS).

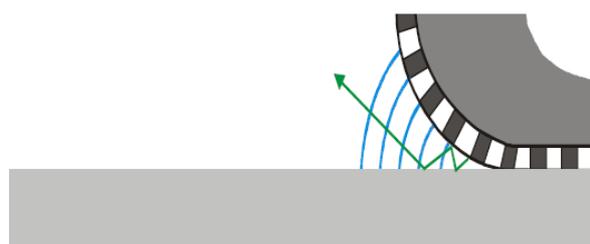


Figure 1.12 : Rayonnement sonore par effet

1.3.4. Propagation du bruit

En général, la propagation du bruit à partir d'une source sonore dans un espace libre s'atténue avec la distance. L'atténuation varie en fonction de la source avec un taux d'atténuation qui dépend notamment de la forme du front d'onde. Pour une source ponctuelle telle qu'une voiture isolée sur une route, on utilise un modèle de propagation d'ondes sphérique. Pour un flux continu de voitures type périphérique on utilise un modèle de source linéaire avec un modèle de propagation cylindrique.

Quel que soit le modèle de propagation utilisé, quand le récepteur et la source sont situés au-dessus d'une surface plane, le bruit reçu par le récepteur est modifié par les réflexions provoquées par la surface lorsque celle-ci est réfléchissante du point de vue acoustique. Dans ce cas le modèle de propagation est très simple, comme le montre l'illustre la figure 1.13. Le rayon réfléchi provient d'une source image identique à la source émettrice. Sa contribution avec celle du rayon direct engendre des interférences qui peuvent renforcer ou atténuer le bruit, même en présence d'un sol totalement réfléchissant. Ce phénomène interférentiel est d'autant plus important que l'on est proche de la source (nul à grande distance).

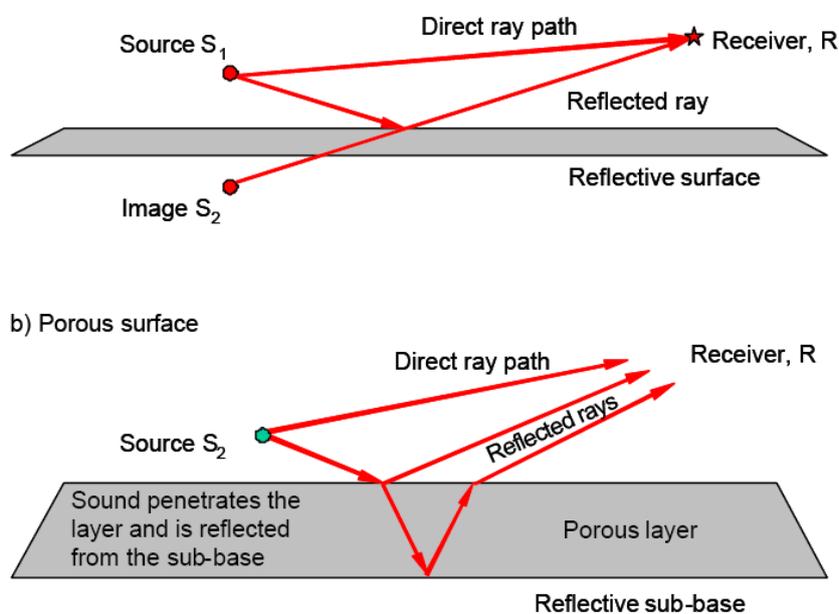


Figure 1.13 : Surface de réflexion acoustique, SILVIA [1].

Quand la surface possède des propriétés d'absorption, notamment en raison de sa porosité, les phénomènes mis en jeu sont plus complexes. Pour déterminer le bruit reçu par le récepteur, il faut prendre en compte le phénomène de déphasage et d'atténuation de l'onde réfléchie, dépendant de la fréquence. De plus, les ondes réfléchies dans les sous couches de la chaussée peuvent également intervenir. Lorsque la surface est poreuse, les interférences se produisent dans le domaine des fréquences dans une gamme allant de 250 à 1000 Hz. Le spectre du bruit des véhicules est justement présent dans cette gamme de fréquence. Par conséquent, il est possible de diminuer le bruit d'un véhicule au récepteur en créant des interférences acoustiques destructives grâce aux propriétés d'absorption acoustique du revêtement. Si le modèle théorique est sans équivoque quant à son efficacité, l'absorption acoustique du revêtement demeure une caractéristique difficile à maîtriser.

1.3.5. Absorption du bruit

Les revêtements routiers ont une capacité à absorber le son qui dépend en grande partie de leur porosité. Les vides reliés contenus dans le revêtement absorbent non seulement le bruit de contact pneumatique / chaussée mais également le bruit de moteur (ce qui est particulièrement intéressant en zone urbaine pour des vitesses faibles où les bruits de moteur sont importants) ainsi que les autres bruits environnants. Pour obtenir une absorption efficace, la couche poreuse du revêtement doit avoir une épaisseur minimale de 4 cm et un pourcentage de vides minimal de 20 % (cf. figure 1.14).

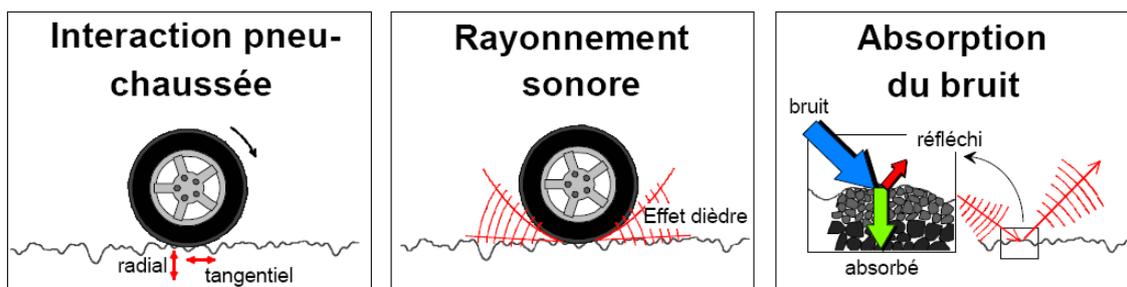


Figure 1.14 : Principaux mécanismes impliqués dans le bruit de roulement.

La figure 1.15 présente un exemple type de coefficient d'absorption acoustique en fonction de la fréquence pour un revêtement de chaussée présentant d'excellentes performances d'absorption acoustique (béton bitumineux drainant noté "BBDr" - cf.§2.2.3).

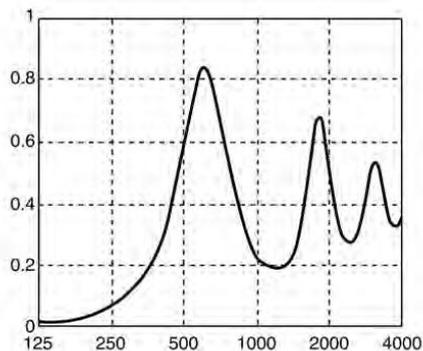


Figure 1.15 : Coefficient d'absorption acoustique en fonction de la fréquence, [3].

La succession de pics et de creux d'absorption est propre à un matériau granulaire. Lors de l'optimisation, on tente "d'adapter" le premier pic d'absorption dans la gamme des basses fréquences du spectre sonore du véhicule (autour de 500 Hz). On tente d'obtenir des pics d'absorptions les plus hauts et les plus larges possibles de façon à améliorer les propriétés absorbantes du revêtement de chaussée. Pour cela, on ajuste les variables technologiques suivantes :

- épaisseur du revêtement,
- pourcentage de vides (interstices, vides d'air),
- répartition des dimensions des granulats, du sable et du fillers,
- type et quantité du liant.

Le modèle d'absorption du son développé par Lerch [2, 28] pour les revêtements bitumineux ouverts ou drainants repose sur les trois paramètres principaux qui sont : la porosité, la résistance au passage de l'air et la tortuosité. La résistance au passage de l'air est proportionnelle à la perméabilité déterminée sur des échantillons "Marshall" [2, 29]. La tortuosité est un descripteur du niveau de distorsion des vides, qui rend compte des variations de section subies par les vides à l'intérieur du revêtement. L'absorption du son augmente avec l'épaisseur de l'enrobé. Le spectre de l'absorption

peut être influencé à la fois par l'épaisseur de couche et par le calibre des granulats. Les revêtements bicouches drainants ont plusieurs maxima d'absorption et possèdent de ce fait un potentiel de diminution du bruit plus élevé. Les revêtements ouverts ou drainants révèlent un potentiel considérable de réduction du bruit. Des essais menés sur des tronçons expérimentaux montrent que le niveau de bruit au passage des véhicules légers (VL) diminue de 4 dB sur un revêtement drainant monocouche, et de 6 dB sur un bicouche, par rapport au plus silencieux des revêtements "fermés" du même calibre. Du côté des poids lourds (PL), la réduction obtenue est de 4 dB sur ces deux mêmes types d'enrobés [2, 30]. Ce potentiel de réduction du bruit est également souligné par d'autres auteurs [2, 6, 31].

Les connaissances théoriques actuelles sont insuffisantes pour permettre de définir précisément les caractéristiques d'absorption avant la réalisation de la route. Les recherches en la matière se poursuivent. On dispose cependant de données empiriques qui permettent d'établir des prévisions. Ainsi, d'après une étude belge [3] fondée sur une série de mesures réalisées sur des revêtements ouverts ou drainants présentant une épaisseur et un pourcentage de vides variables, l'absorption acoustique du bruit de roulement (α_L) peut être exprimée en fonction de l'épaisseur de la couche e et du pourcentage de vides v . La formule est la suivante :

$$\alpha_L = 0,005 ev$$

α_L exprimé en dB(A)

pour $20 \text{ mm} < e < 40 \text{ mm}$

pour $15 \% < v < 25\%$

Ce résultat a ensuite été corroboré par d'autres études (suédoise et norvégienne, [3]). Ainsi une étude norvégienne a estimé que, pour un flux de circulation de 500 véhicules par heure, l'amélioration de la réduction de bruit par absorption était de 2,8 dB(A) si le pourcentage de vides passait de 16 à 21 %, avec une épaisseur de couche $e = 50 \text{ mm}$. La formule susmentionnée prévoit seulement une amélioration de 1,25 dB(A). On peut supposer que l'absorption acoustique assurée par le revêtement routier est également renforcée lorsque l'épaisseur de la couche et le pourcentage de vides augmentent. Il conviendrait de réaliser une étude plus détaillée pour obtenir une meilleure quantification.

Les mesures d'absorption acoustique donnent des indications concernant le spectre d'absorption du revêtement et sa possible modification sous l'action du colmatage. Il existe différentes méthodes de mesurage de l'absorption acoustique des revêtements :

- "Impedance Tube Method" (technique du tube d'impédance, tube de Kundt),
- "Guard tube Method",
- "Extended Surface Method" (méthode de la surface étendue).

La technique du tube d'impédance mesure l'absorption du son d'un échantillon (ou carotte) situé à une extrémité d'un long tube en laboratoire, tandis que les deux autres méthodes sont réalisées directement sur la surface du revêtement.

Avec la méthode du "Guardtube", le coefficient d'absorption acoustique d'une petite portion de la surface est déterminé avec un double tube placé directement sur le revêtement (ISO 13472-2). Dans le cas du mesurage de la surface étendue, l'absorption d'une plus grande surface est mesurée au moyen d'un hautparleur et d'un microphone en champ libre. Dans ces deux dernières méthodes, le coefficient d'absorption est calculé à partir du signal de réponse (ISO 13472-1:2002).

D'autres méthodes de mesures *in situ* ont également été proposées [45, 46].

1.3.6. Effets non exclusifs au revêtement de chaussée

Des effets non liés exclusivement à la chaussée contribuent au bruit de roulement, tels que les caractéristiques du pneumatique et la projection de gouttelettes d'eau par temps de pluie. Précisons également l'importante contribution du comportement routier individuel : une conduite sur route soucieuse de l'environnement peut mener à une réduction du bruit de l'ordre de 7 dB(A) [2, 31].

1.3.6.1. Rôle du pneumatique

Les caractéristiques des pneumatiques ont une influence significative sur le bruit de roulement. En effet, des différences de niveaux sonores relativement importantes peuvent exister en fonction des caractéristiques (profils, largeur, matériau) des pneumatiques utilisés. Lors d'une étude au Pays-Bas, dans le cadre du programme de recherche IPG, les performances acoustiques de plus de 200 pneumatiques différents, destinés à l'usage sur véhicules légers, ont été testées selon les critères définis par la Directive européenne 2001/43/CE⁵. Les résultats de cette étude, publiée en 2007, font apparaître des différences de niveaux sonores pouvant aller jusqu'à 9 dB(A) [52].

Les principaux paramètres d'influences sont :

- les caractéristiques du matériau (raideur de l'élastomère⁶),
- la géométrie (largeur du pneumatique⁷ et géométrie des sculptures⁸),
- l'utilisation du pneumatique⁹ (charge, pression de gonflage, vitesse de rotation...).

Les pneumatiques ont eu tendance à s'élargir au cours des dernières années, non seulement sur les voitures mais aussi sur les poids lourds (introduction de pneumatiques super-larges), en relation avec l'évolution du poids des véhicules et du renforcement continu des exigences de sécurité. Pour les voitures par exemple, le bruit dû aux pneumatiques augmente de 0,2 à 0,4 dB(A) pour chaque augmentation de largeur de 10 mm.

Les pneumatiques les moins bruyants se distinguent par des lamelles au lieu de languettes / blocs, de même que par une distribution à la fois asymétrique et légèrement décalée des éléments du profil [2, 33].

1.3.6.2. Projection de gouttelettes d'eau

Sur un revêtement mouillé, un surcroît de bruit est produit dans la gamme des fréquences supérieures à 1000 Hz, dû à la projection de gouttelettes. L'impact de la présence d'eau sur le bruit dépend du type de revêtement et de la vitesse.

Pour un revêtement classique, ce phénomène peut conduire à une augmentation significative du bruit qui est plus importante proportionnellement à vitesse faible (cf. §1.4.5). On peut atteindre + 6 dB(A) pour des vitesses inférieures à 60 km/h sur un revêtement non ouvert. Pour les vitesses élevées, l'augmentation maximale de bruit se situe plutôt autour de 2 à 3 dB(A).

Avec un revêtement acoustique drainant ou doté de macro-irrégularités suffisantes, ce phénomène est largement réduit.

⁵ Directive 2001/43/CE du Parlement européen et du Conseil du 27 juin 2001 modifiant la directive 92/23/CEE du Conseil relative aux pneumatiques des véhicules à moteur et de leurs remorques ainsi qu'à leur montage.

⁶ Une raideur élevée accentue la bruyance pneumatique.

⁷ L'augmentation progressive dans le parc de véhicules actuel de la largeur du pneumatique provoque une augmentation sensible du bruit de trafic (de l'ordre de 0,3 dB(A) par centimètre supplémentaire) [2].

⁸ La géométrie des sculptures (motifs, répartition, profondeur...) est un paramètre déterminant du bruit. Un pneumatique à sculptures prononcées sera plus bruyant qu'un pneumatique plus lisse, les motifs aléatoires sont préférés aux motifs réguliers qui provoquent des fréquences marquées.

⁹ Le bruit de roulement augmente avec le logarithme de la vitesse. La pression de gonflage et la charge du pneumatique conditionnent la rigidité structurelle du pneumatique, et influencent aussi, dans une moindre mesure, la génération de bruit.

1.3.7. Synthèse

Le tableau 1.5, extrait du rapport "Revêtements silencieux dans les localités Suisse" [2], synthétise les différents mécanismes impliqués dans la formation et la propagation du bruit de contact pneumatique / chaussée. L'addition de l'ensemble des effets forme ce que l'on nomme le bruit de contact pneumatique / chaussée. La représentation et la pondération de chacun des mécanismes varient d'un auteur à l'autre [2, 6, 30, 33]. Le programme de recherche SILVIA [1] propose en conclusion un modèle simplifié : "Il est estimé que pour des conditions standard, le bruit de contact pneumatique / chaussée est principalement composé de deux sources : les vibrations et le pompage d'air. La première source se produisant principalement en dessous de 1000 Hz et la seconde se produisant principalement au-dessus de 1000 Hz."

	Effet	Fréquence	Importance
Impulsions mécaniques	Impulsions exercées sur les pneumatiques par le contact entre la texture du revêtement et les éléments de profil du pneumatique.	Dépend de la vitesse, mais dans tous les cas inférieure à 1250 Hz.	+++
	Stick-slip : secousse des éléments de profil du pneumatique. Dans le cas extrême, audible sous la forme d'un "crissement" dans les virages.	Elevée > 1250 Hz	+
	Stick-snap : adhésion entre le profil du pneumatique et la chaussée.	Elevée > 1250 Hz	+
Impulsions aérodynamiques	Air-pumping : compression, puis détente soudaine de l'air piégé entre les pneumatiques et les espaces vides non communicants de la chaussée.	Elevée > 1250 Hz	++
Amplification du son	Effet dièdre ("horn effect") : réflexions successives de l'onde sonore dans le dièdre formé par le pneumatique et la chaussée, dont la conséquence est une amplification du son.	1-3 kHz	+ ?
Absorption du son (acoustique)	Les vides communicants contenus dans le revêtement absorbent non seulement le bruit de contact pneumatique / chaussée mais également le bruit moteur. Cet effet est d'autant plus prononcé que la perméabilité des revêtements est élevée.	Absorption maximale dépend de l'épaisseur de la couche	+++
Absorption du son (mécanique)	Les revêtements souples et viscoélastiques ainsi que ceux qui présentent un pouvoir absorbant élevé sont les moins bruyants, car ils réduisent les impulsions sur les pneumatiques et/ou la propagation du son.	Absorption maximale d'environ 1 kHz.	++

Tableau 1.5 : Différents mécanismes impliqués dans la formation et la propagation du bruit de contact pneumatique / chaussée, [2].

1.4. Caractéristiques du revêtement influant sur le bruit de contact pneumatique / chaussée

Le pneumatique et la chaussée interviennent tous les deux dans le bruit de contact pneumatique / chaussée. Ce document étant destiné essentiellement aux services des collectivités territoriales participant au choix des revêtements de chaussée, nous présentons essentiellement les caractéristiques du revêtement routier influant significativement sur les performances acoustiques, tels que la texture de surface et le relief (cf. §1.4.2), les propriétés de porosité et de viscoélasticité (cf. §1.4.3 et §1.4.4). L'influence des chaussées mouillées est également présentée succinctement au §1.4.5.

Afin d'appréhender ces éléments, une description préalable des différentes couches constituant un revêtement de chaussée classique est proposée au §1.4.1.

1.4.1. Revêtement de chaussée classique

Les caractéristiques des revêtements de chaussée jouent un rôle primordial dans les phénomènes physiques à l'origine du bruit de contact pneumatique / chaussée. Avant de présenter les paramètres d'influences des revêtements sur le bruit de contact pneumatique / chaussée, nous proposons ci-après une description succincte d'un revêtement de chaussée usuel.

La figure 1.16 présente une coupe transversale d'une chaussée offrant une description fonctionnelle d'un revêtement de chaussée classique. Une chaussée comprend toujours une couche supérieure appelée revêtement routier, ainsi qu'une ou plusieurs couches inférieures. Le revêtement routier est exposé à l'usure, mais aussi aux effets des conditions météorologiques et doit par conséquent être remplacé et / ou entretenu à intervalles réguliers.

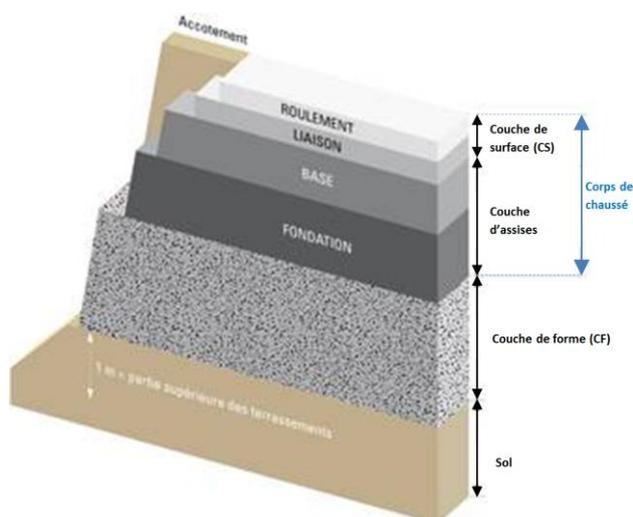


Figure 1.16 : Schéma de coupe d'une chaussée.

Une chaussée assure plusieurs fonctions simultanées :

- la couche supérieure (couche de roulement) doit protéger la couche inférieure (couche d'assise) contre l'humidité (sauf dans le cas d'une couche supérieure poreuse) ;
- la couche supérieure doit répartir les contraintes exercées par les roues des véhicules sur une surface plus étendue (sauf dans le cas de couches supérieures minces) ;
- les pneumatiques doivent présenter une adhérence suffisante avec le revêtement routier, pour permettre à l'utilisateur de freiner et de négocier ses virages en toute sécurité ;
- le revêtement routier (couche de roulement) doit permettre à l'utilisateur de rouler en silence (niveau de bruit à l'intérieur du véhicule et aux abords de la route) et lui assurer une conduite confortable ;
- la consommation des véhicules doit être la plus réduite possible, tant du point de vue économique qu'environnemental.

A l'exception des chaussées pavées, les revêtements de chaussée incluent généralement les éléments suivants :

- des **granulats**¹⁰ dont les dimensions ne peuvent dépasser certaines limites. Il s'agit du composant principal (au moins 40 à 50 % de la masse). Les granulats ont une taille minimale de 2 mm ;
- du **sable**, dont le poids peut être équivalent à celui des granulats. Les granulats de sable ont une granulométrie comprise entre 0,063 mm et 2 mm ;
- des particules de remplissage, appelées "**fillers**" ou "**finés**", dont les dimensions sont inférieures à 0,063 mm ;
- du **liant**¹¹, les plus usuels sont le bitume et le ciment, bien qu'il existe d'autres types de liants - des résines (synthétiques) ou végétales. Le pourcentage de liant représente 4 à 8 % du poids. Il a une double fonction: agglomérer ensemble les différents composants et, en fonction de la compacité du matériau, assurer l'étanchéité des couches inférieures.

1.4.2. Irrégularités de surface

Les irrégularités de surface d'une chaussée conditionnent directement les performances acoustiques du revêtement de chaussée, à tel point que des modèles de prévision du bruit ont été développés à partir des caractéristiques de surface de la chaussée. Deux paramètres influent fortement sur le niveau de bruit : la texture et le relief de la surface de la chaussée. Ces paramètres ont également une influence primordiale sur les performances mécaniques des revêtements de chaussée. Ainsi, les travaux de développement de revêtements de chaussées "silencieux" (parfois également identifiés par le terme "phonique"), doivent impérativement évaluer l'impact des développements sur l'ensemble des paramètres mécaniques, afin d'éviter que le gain acoustique ne se fasse au détriment de l'adhérence et de la sécurité.

1.4.2.1. Texture de surface

La texture d'un revêtement de chaussée est caractérisée par la répartition, les tailles et les différentes profondeurs des irrégularités présentes en surface. Les irrégularités du revêtement routier sont mesurées généralement au moyen d'un profilomètre laser¹². Les irrégularités sont alors modélisées au moyen d'une transformée de Fourier sous forme d'un spectre de texture (amplitudes et longueurs d'ondes). Le spectre de texture contient à la fois l'information sur la profondeur des irrégularités caractérisées par l'amplitude (dimension verticale) et l'information sur les largeurs des irrégularités représentées par la longueur d'onde (dimension horizontale).

En réalité, il n'y a pas une texture, mais plusieurs textures en fonction de l'échelle d'observation (cf. figures 1.18 et 1.19). Afin de faciliter la caractérisation d'un revêtement de chaussée, la gamme des longueurs d'ondes associées aux irrégularités de surface a été divisée en 4 classes de texture. Ces classes correspondent à plusieurs échelles d'observation définies en fonction des longueurs d'ondes (*L*) suivantes :

¹⁰ Granulats : matériaux rocheux (du sable aux gravillons) concassés et/ou criblés pour être ensuite mélangés à du bitume pour constituer des enrobés, ou à du ciment pour constituer du béton.

¹¹ Un liant routier est ce qui permet de coller les granulats entre eux et d'assurer une bonne imperméabilisation de la chaussée. Un liant peut être bitumineux ou hydraulique (ciment).

¹² La méthode du profilomètre consiste à mesurer des profils de texture de la surface de la chaussée par balayage laser. L'analyse du profil est obtenue au moyen d'une transformation de Fourier (amplitudes et longueurs d'ondes de texture associées). Les données sont utilisées pour le calcul de critères descriptifs mathématiques et la modélisation des caractéristiques du revêtement (ISO 13473-2). La méthode de la tache de sable consiste à répartir du matériel finement grenu de telle manière que soit formée une tache approximativement circulaire. En divisant le volume du matériau réparti par la surface de la tache de sable, on obtient la profondeur moyenne de texture.

- *microtexture* : dimension des irrégularités $L < 0,5 \text{ mm}$,
- *macrotexture* : dimension des irrégularités $0,5 \text{ mm} < L < 50 \text{ mm}$,
- *mégatexture* : dimensions des irrégularités $50 \text{ mm} < L < 500 \text{ mm}$,
- *défauts de planéités* : dimension des irrégularités $L > 500 \text{ mm}$.

La figure 1.17 illustre l'influence des longueurs d'onde de texture sur les performances du revêtement de chaussée telles que la résistance au roulement, l'adhérence ou le bruit de contact pneumatique / chaussée. Ainsi, les longueurs d'onde de texture, dans les classes macro et mégatexture soit $0,5 \text{ mm} < L < 500 \text{ mm}$, sont importantes à maîtriser pour contrôler :

- le bruit du contact pneumatique / chaussée,
- l'adhérence,
- la résistance au roulement.

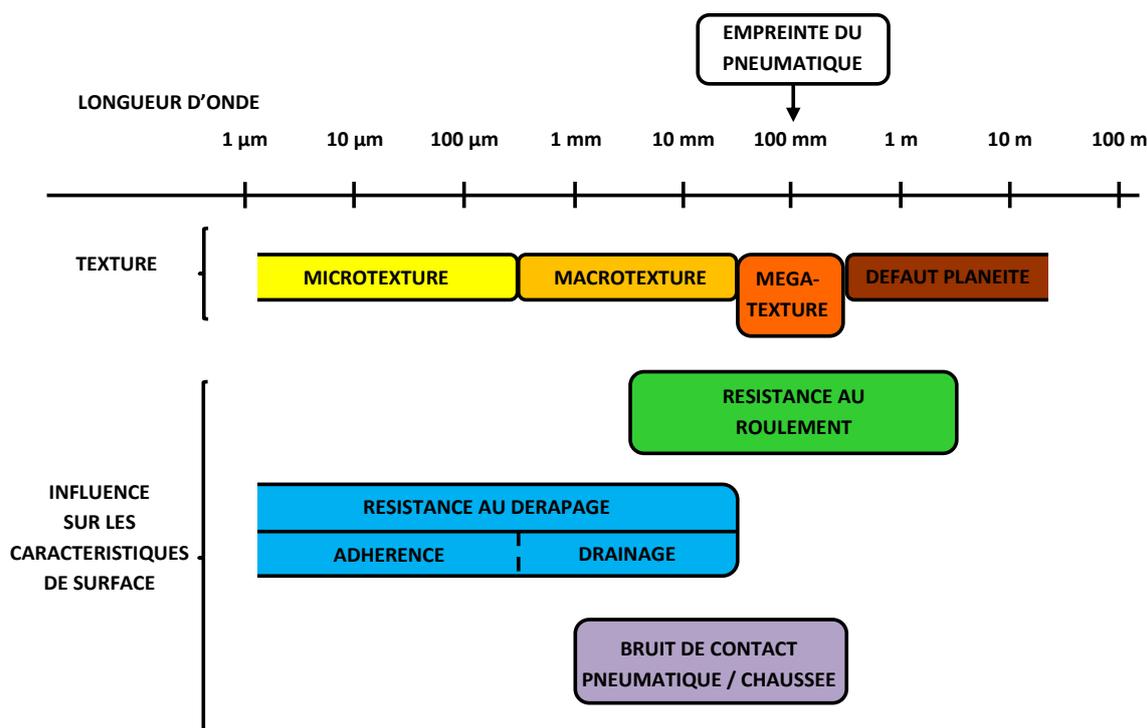


Figure 1.17 : Classes d'irrégularités d'un revêtement de chaussée : Influence de la texture de la surface sur la caractérisation des surfaces routières (bruit, adhérence et résistance au roulement), SILVIA [1].

A titre pédagogique, la figure 1.18 propose un exemple de profils de surface exclusivement "microtexture" et "macrotexture". Cet exemple est purement artificiel. En pratique, les profils combinent une composante "microtexture" et "macrotexture", comme l'illustre la figure 1.19.

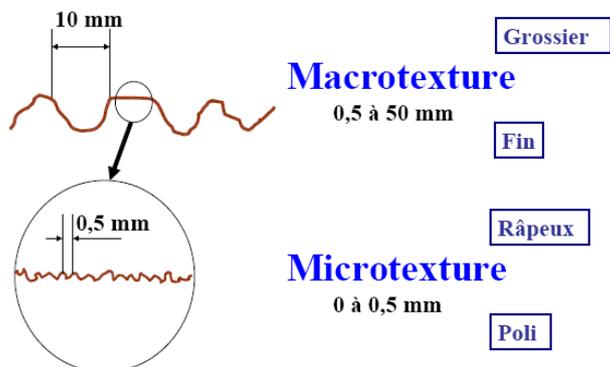


Figure 1.18 : Exemple de profil de texture de la surface d'un revêtement ; microtexture et macrotexture (Source : COLAS).

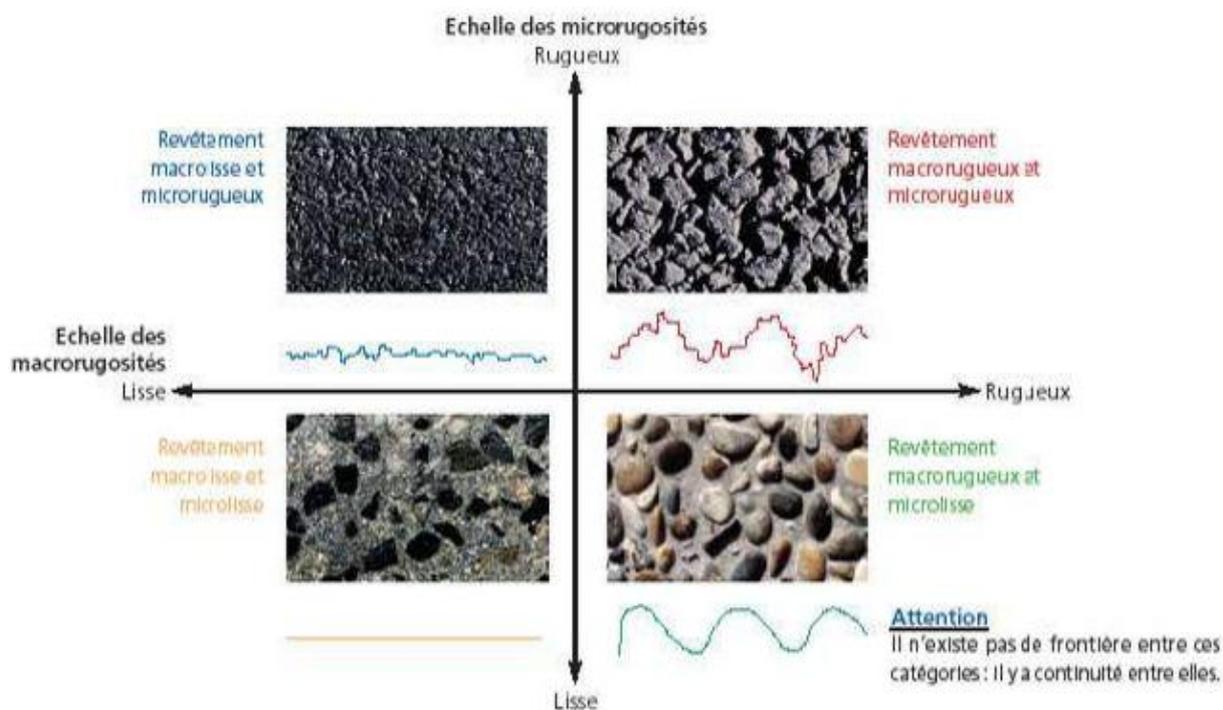


Figure 1.19 : Composantes "microtexture" et "macrotexture" des revêtements de chaussée, (source : COLAS).

Nous détaillons ci-après l'impact des textures suivant les classes définies précédemment sur les propriétés acoustiques du revêtement de chaussée.

a. Microtexture : L de 0 à 0,5 mm

La microtexture entre en jeu dans plusieurs caractéristiques liées au revêtement de chaussée :

- l'adhérence,
- l'usure des pneumatiques,
- la génération de bruit haute fréquence si la surface est lisse (cas des parkings sur enduit de ciment).

La microtexture, avec une longueur d'onde inférieure à 0,5mm, est importante pour l'adhérence des revêtements mais n'est pas corrélée avec le bruit du contact pneumatique / chaussée [2, 31]. Sur les surfaces lisses, ce sont essentiellement les bruits émis dans le domaine des hautes fréquences qui augmentent (au-dessus de 1250 Hz - mécanismes de "*stick-slip*" et "*stick-snap*").

b. Macrotexture : L de 0,5 mm à 50 mm

La macrotexture entre également en jeu dans plusieurs caractéristiques liées au revêtement de chaussée :

- l'adhérence,
- la projection d'eau,
- le bruit,
- et la résistance au roulement (consommation de carburant et émission de CO₂).

La macrotexture, caractérisée par des longueurs d'onde comprises entre 0,5 et 50 mm. Elle contribue largement à la formation du bruit de contact pneumatique / chaussée (cf. figure 1.17). Au début des années 1980 [2, 15], il est apparu nécessaire de distinguer deux zones dans cette classe, car deux effets de la texture sur le bruit ont été mis en évidence :

- au-dessous de 10 mm pour les voitures et de 14 mm pour les camions, les irrégularités profondes contribuent à la génération du bruit par vibration du pneumatique ;
- les aspérités profondes comprises entre 0,5 mm et 15 mm peuvent contribuer à réduire le phénomène d'air pumping présenté au §1.3.2. En effet, ces aspérités spécifiques permettent l'évacuation latérale de l'air comprimé entre les creux du profil du pneumatique et la surface de roulement.

Si la macrotexture est dotée d'un motif régulier - des rainures perpendiculaires à l'axe de la route, par exemple, le spectre du bruit de roulement présente un ou plusieurs tons purs (son tonal). Ce bruit "plaintif" caractéristique est extrêmement gênant. Le même phénomène se produit sur un pavage en béton lorsque les joints sont orientés perpendiculairement au sens de circulation. L'une des solutions envisageables consiste à poser les pavés en chevrons.

Concernant la macrotexture, il est souvent admis que seule la présence d'agrégats à la surface de la route permet d'obtenir une macrostructure. Toutefois, celle-ci peut aussi résulter du traitement appliqué au revêtement (du béton de ciment, par exemple) : broissage, passage d'une toile de jute ou peignage du béton frais, rainurage du béton durci, ou encore impression d'un motif immédiatement après la pose du béton de ciment ou du béton bitumineux...

c. Mégatexture : L de 5 cm à 50 cm

La mégatexture entre en jeu dans :

- la génération de bruit basses fréquences,
- le contrôle et la stabilité des véhicules,
- l'accumulation d'eau (flaque),
- la dégradation des pneumatiques,
- la résistance au roulement.

Les profondeurs des irrégularités de la mégatexture doivent être tenues aussi basses que possible. Ceci est possible en assurant une répartition homogène des composants :

- les granulats doivent être de taille uniforme et bien calés les uns contre les autres,
- les granulats non cubiques doivent être mis à plat au moyen d'un compactage au cylindre lisse,
- l'épaisseur de la sous-couche doit être régulière lors du compactage afin d'éviter la formation de mégatexture.

Dans la pratique, une mégatexture peut se présenter comme :

- un défaut résultant d'une erreur commise lors de la pose du revêtement de chaussée. Il peut par exemple s'agir des ondulations parfois observées à la surface d'un revêtement en béton. Ces irrégularités sont dues aux vibrations de la barre transversale utilisée pour lisser le béton liquide. La barre est soumise à des vibrations pour compacter le béton ;
- apparaître au fil du temps, à la suite de l'usure ou de signes de fatigue de la couche supérieure du revêtement routier ;
- ou créée par à une macrotexture non homogène. Il peut par exemple s'agir de la ségrégation de gros agrégats à la surface d'un enrobé bitumineux de forte granulométrie ;
- certains types de revêtements présentent une mégatexture intrinsèque, souvent combinée à une macrotexture peu marquée - voire inexistante. Les pavés béton font partie des revêtements dotés d'une mégatexture intrinsèque et d'une macrotexture réduite. Les dalles en porphyre présentent elles aussi une mégatexture intrinsèque, mais sont tout à fait dépourvues de macrotexture, de sorte que ce revêtement est à la fois bruyant et glissant.

d. Prévion du bruit en fonction des niveaux de texture

Il est possible de prévoir le niveau sonore d'un revêtement donné en s'appuyant sur les niveaux de texture mesurés pour les longueurs d'onde de texture LT80 (mégatexture 80 mm) et LT5 (macrotexture 5 mm). La figure 1.20, basée sur la formule proposée pour le "Estimated Road Noisiness Level" (ERNL) [3]¹³, illustre ce propos.

$$ERNL = 60 + 0,39 LT80 - 0,13 LT5$$

La constante "60" a été choisie de façon arbitraire pour obtenir des valeurs comparables aux niveaux de bruit mesurés à l'aide de la méthode de mesure "au passage", cf. §2.4.1.1).

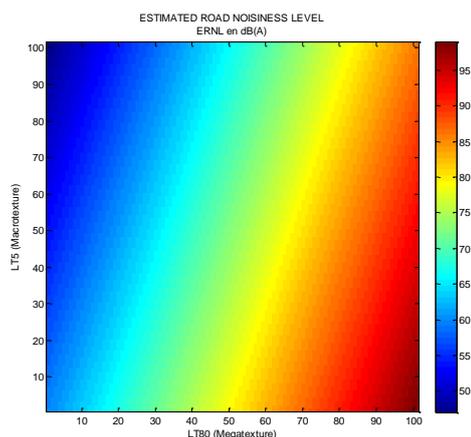


Figure 1.20 : "Estimated Road Noisiness Level (ERNL).

¹³ Descornet G., documents de travail non publiés, destinés au groupe de travail ISO/TC43/SC1/WG27.

1.4.2.2. Relief de surface

Le relief de la surface est une propriété essentielle des revêtements de chaussée qui ne peut être décrite totalement au moyen de spectres de texture. Lors de la formation du bruit de contact pneumatique / chaussée, la différence est effectivement notable si la surface est de forme concave dite texture positive ou convexe dite texture négative. Les textures négatives sont à privilégier (cf. figures 1.21 et 1.22).

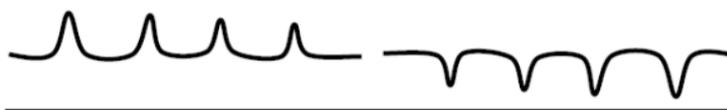


Figure 1.21 : Spectres de texture identiques avec des propriétés acoustiques différentes, à gauche : positive, à droite : négative, [2].

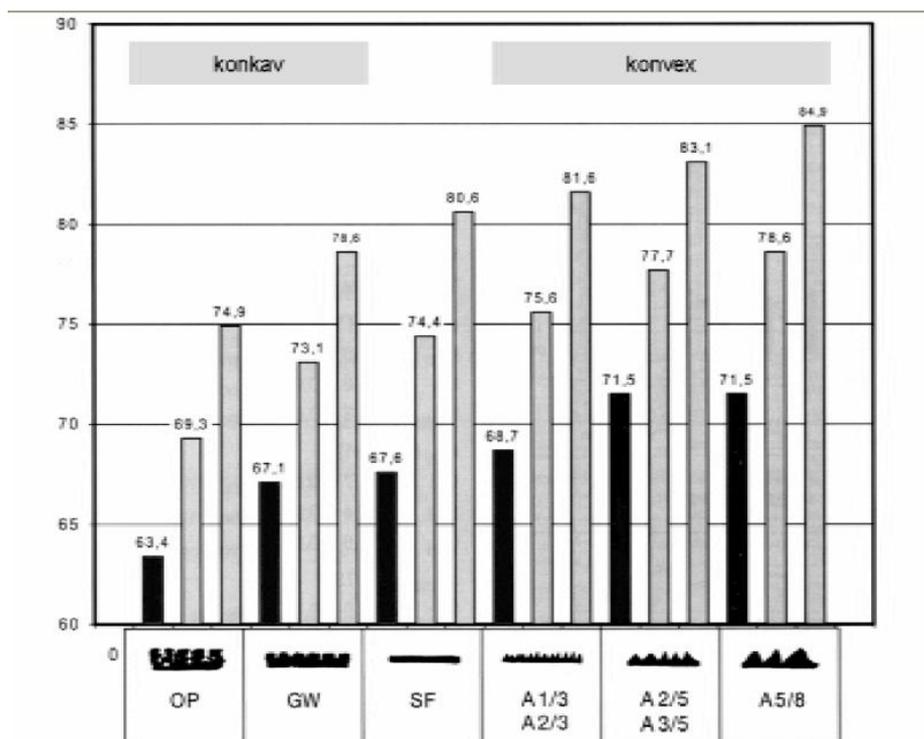


Figure 1.22: Influence du relief de la surface sur le niveau sonore total pour les vitesses de 50, 80 et 120 km/h. (OP): Béton Bitumineux Drainant ; (GW): Compacté, (SF): Surface polie, (A xx) : Enduit Superficiel avec différentes tailles de granulats [2, 30].

1.4.3. Porosité

Avec la perméabilité, la porosité constitue le facteur le plus important et le mieux maîtrisé pour la détermination du pouvoir d'absorption d'un revêtement routier. La porosité décrit la teneur en vides communicants d'un revêtement de chaussée. Les vides non communicants ne contribuent pas à augmenter l'absorption du son. Par opposition aux revêtements "poreux", les revêtements dont les vides sont peu nombreux et / ou isolés les uns des autres sont qualifiés de dense. Le programme de recherche SILVIA identifie ainsi 4 grandes familles de revêtements en fonction des volumes de vides d'airs communicants présents :

- dense (4 - 9%),
- semi dense (9 - 14%),
- semi ouvert (14 - 19%),
- ouvert (ou drainant > 19%).

La réduction du bruit engendrée par les revêtements de chaussée ouverts est basée sur plusieurs facteurs :

- le phénomène d'air pumping diminue, car la perméabilité du revêtement facilite l'écoulement de l'air et empêche l'augmentation de la pression du fluide dans l'aire de contact pneumatique / chaussée,
- lors des réflexions successives entre le châssis du véhicule et la chaussée, le son perd une partie de son énergie acoustique à chacune des réflexions,
- l'absorption du son au cours du processus de propagation est le facteur le plus important. La quasi-élimination de l'effet dièdre en est une conséquence directe [2,28].

Un avantage particulier des revêtements de chaussée ouverts ou drainants est que leur efficacité augmente sur les longues distances, car les propriétés absorbantes ont dans ce cas davantage d'espace pour agir (interactions successives entre le son et le revêtement). Un véhicule qui s'approche provoque une pointe de bruit beaucoup plus courte sur un revêtement absorbant que sur une surface "étanche" au son. Une différence de 2-3 dB en faveur du revêtement absorbant a été mesurée, à une distance de 10 m de la source [2, 34].

1.4.4. Comportement viscoélastique

Le comportement viscoélastique de la couche de surface du revêtement de chaussée peut être un facteur important réducteur de bruit. La réduction du bruit peut être très importante, à condition toutefois de disposer d'un revêtement avec une élasticité comparable à celle des pneumatiques eux-mêmes. Ainsi, avec une couche en élastomère (semblable aux tapis de protection des places de jeux pour enfants), les niveaux sonores pourraient être diminués de 4 dB pour les VL et de 6 dB pour les PL [2, 30]. Evidemment, cette solution extrême s'inscrit exclusivement dans le domaine expérimental, et ne pourrait satisfaire les principales exigences demandées aux revêtements de chaussées. Deux arguments permettent d'expliquer cette diminution du bruit :

- la vibration du pneumatique est moindre lors du "choc" avec le revêtement en raison du caractère viscoélastique à température ambiante,
- le contact pneumatique / chaussée est "temporellement davantage prolongé" dans le cas d'un revêtement élastique, cet effet amortissant réduit fortement les vibrations du pneumatique¹⁴,
- la vibration produite par le contact pneumatique / chaussée se propage également à travers le revêtement lui-même. Selon le facteur de perte et l'amortissement interne du revêtement, la propagation de la vibration est plus ou moins atténuée. L'amortissement interne du caoutchouc est supérieur d'un facteur 10 à 100 par rapport à celui du béton bitumineux ou un béton de ciment.

Dans le cadre du projet SILENCE, des essais ont été réalisés avec des revêtements de chaussée dotés de granulats de caoutchouc. La réduction de bruit de roulement supplémentaire due à la présence des granulats de caoutchouc a été estimée à environ 1 dB(A).

Parmi les revêtements bitumineux, des différences de viscoélasticité en fonction du liant utilisé sont également rapportées. Les implications pour la pratique sont résumées de la manière suivante [2, 35] : pour garantir la longévité de la structure de surface, il ne faut pas construire de revêtements bitumineux mous, mais utiliser un bitume modifié par des polymères¹⁵ (élastomère bloc styrène butadiène styrène...). Un liant modifié avec des polymères visqueux et/ou l'utilisation d'un filler à haut pouvoir rigidifiant (chaux éteinte...) permettent d'augmenter l'épaisseur de liant disponible pour l'amortissement des vibrations sans écoulement de ce dernier pendant la fabrication et le transport de l'enrobé.

L'adjonction de poudrette de caoutchouc ou l'augmentation significative du taux de liant bitumineux permettent d'améliorer l'amortissement des vibrations en prévenant le contact entre les granulats suite à la déformation plastique. Cette approche séduisante n'a pour l'instant pas pu être mise en œuvre dans des conditions satisfaisantes de durabilité¹⁶.

Les revêtements "poroélastiques" sont un exemple de développement intéressant, car ils combinent à la fois les propriétés des revêtements viscoélastiques à celles des revêtements à porosité ouverte. Leur potentiel de réduction du bruit est compris entre 7 et 12 dB(A). Ces revêtements font l'objet d'une description plus détaillée au §2.2.5.

¹⁴ On peut expliquer ce phénomène par analogie avec un coup de marteau sur une cloche. Un impact extrêmement bref va engendrer des amplitudes de vibrations de la surface de la cloche plus importantes qu'un impact temporellement plus prolongé.

¹⁵ Un polymère (étymologie : du grec *pollus*, plusieurs, et *meros*, partie) est un système formé par un ensemble de macromolécules de même nature chimique. Les termes « polymère » et « macromolécule » sont fréquemment confondus.

¹⁶ Des expériences concrètes, rapportées par l'USIRF, montrent que l'adjonction de poudrette de caoutchouc à la formulation de bétons bitumineux peut parfois engendrer un effet secondaire après plusieurs cycles de sollicitations : désagrégation du revêtement (effet de "masse molle" à l'origine de la décohésion des granulats).

1.4.5. Revêtement mouillé

La présence d'eau sur le revêtement peut avoir une influence considérable sur la production de bruit. Il ressort d'une étude [3]¹⁷ que l'eau présente sur le revêtement routier provoque une augmentation de bruit beaucoup plus importante lorsque la vitesse est peu élevée. La quantité d'eau sur le revêtement étanche joue un moindre rôle. Une autre étude [3, 16] a constaté une modification des caractéristiques d'absorption sur revêtement ouvert ou drainant. Le pic d'absorption se déplace vers les basses fréquences et est moins élevé lorsque la quantité d'eau présente dans les vides augmente. Le Centre (belge) de recherches routières a lui aussi analysé l'influence du revêtement routier. En ce qui concerne la production de bruit, il semble que l'impact de l'eau présente sur le revêtement dépend largement de la texture de ce revêtement. Sur du béton de ciment strié ou de l'enrobé drainant (BBDr), l'eau n'entraîne apparemment guère d'augmentation du niveau sonore. On observe le phénomène inverse dans le cas de l'asphalte coulé, qui génère un niveau de bruit sensiblement accru. Par temps de pluie, le béton bitumineux dense devient en effet aussi bruyant que le béton de ciment strié (extrêmement bruyant même par temps sec). Sandberg et Ejsmont [6] fournissent des valeurs approximatives reflétant l'influence de l'humidité sur le béton bitumineux dense, en fonction de la quantité d'eau présente sur le revêtement et de la vitesse du véhicule (cf. tableau 1.6 et figure 1.23).

Quantité d'eau sur le revêtement	0-60 km/h	61/80 km/h	81-130 km/h
Sec	référence	référence	référence
Humide (bruine)	+ 2 dB(A)	+ 1 dB(A)	+ 0 dB(A)
Mouillé (pluie modérée)	+ 4 dB(A)	+ 3 dB(A)	+ 2 dB(A)
Mouillé (forte pluie)	+ 6 dB(A)	+ 4 dB(A)	+ 3 dB(A)

Tableau 1.6 : Valeurs approximatives reflétant l'influence de l'humidité sur le béton bitumineux dense, en fonction de la quantité d'eau présente sur le revêtement et de la vitesse du véhicule, [6].

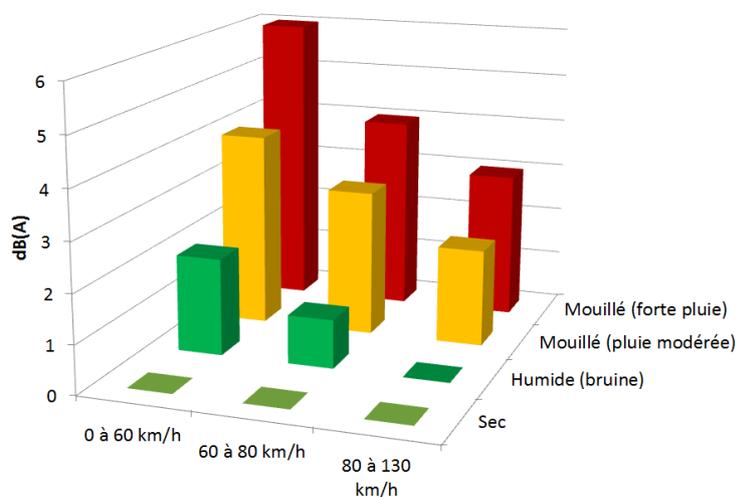


Figure 1.23 : Valeurs approximatives reflétant l'influence de l'humidité sur le béton bitumineux dense, en fonction de la quantité d'eau présente sur le revêtement et de la vitesse du véhicule, [6].

Le mesurage de la perméabilité d'un revêtement est réalisé par la mise en place d'un système de circulation d'eau stationnaire, sous hauteur hydraulique constante, et à travers une section circulaire (la base de l'appareil). L'étanchéité vis-à-vis de l'extérieur est assurée par un joint de mastic synthétique dont la forme et la section sont cruciformes. En outre, l'appréciation de la qualité d'un revêtement de chaussée à évacuer l'eau rapidement correspond au temps d'écoulement, sous un panneau de caoutchouc posé sur la surface de roulement, d'une certaine quantité d'eau contenue dans un cylindre (Norme SN 640 433).

¹⁷ Liedl,...

2. Evolution des revêtements de chaussée

Les principales évolutions technologiques concernent essentiellement les bétons bitumineux. Ces évolutions ont à l'origine pour principal objectif l'amélioration des propriétés d'adhérence et la réduction de l'épaisseur de la couche de roulement :

- développement des propriétés de drainage de l'eau pour l'adhérence,
- introduction de discontinuité granulométrique pour faciliter le compactage (dans les années 1980 avec les BBSG 0/10 discontinuité 4/6 par exemple) et développement de produits à forte résistance mécanique pour réduire la consommation en granulats à hautes résistances au polissage en réduisant les épaisseurs (revêtements minces et très minces).

Des réductions significatives en termes de performances acoustiques ont alors été observées, en particulier lorsque des granulats fins étaient utilisés. Plus récemment, des développements ayant pour objectif la réduction des émissions sonores ont été mis en œuvre. Ils combinent essentiellement les différentes solutions mises en évidence pour l'amélioration de l'adhérence et la minimisation des épaisseurs des revêtements. Les derniers développements intègrent par exemple une réduction des vibrations par introduction d'élastomères dans leur composition. Le tableau 2.1 synthétise les principaux types de revêtements de chaussée mis en œuvre en France utilisant le bitume comme liant principal. L'épaisseur des solutions de couche de roulement varie en fonction des gammes de produits utilisés. La figure 2.1 propose une illustration graphique de l'épaisseur des couches de roulement de différents types de chaussées en béton bitumineux.

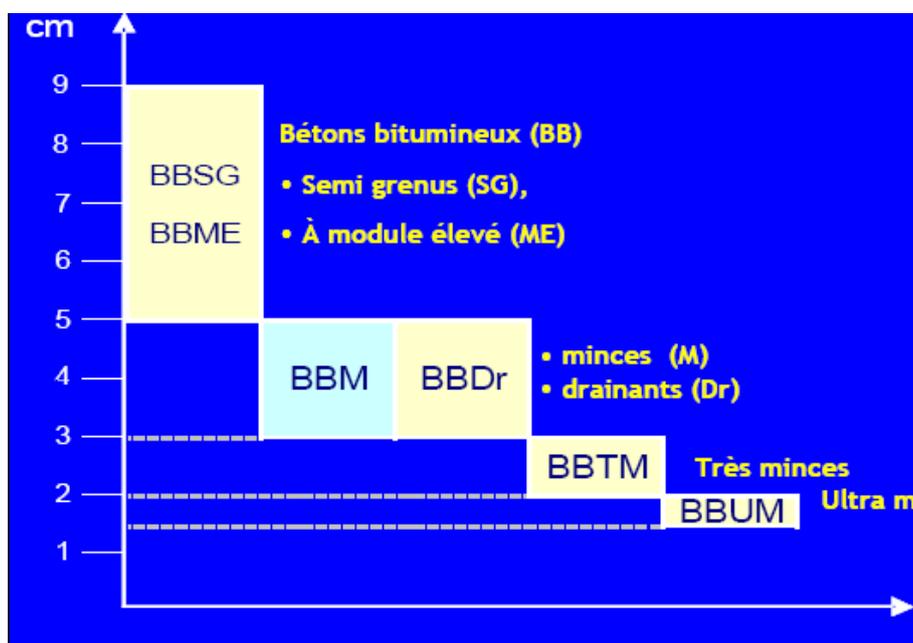


Figure 2.1 : Epaisseurs des enrobés de couche de roulement (source : COLAS).

Type	Identifiant usuel	Epaisseur approximative	Spécificités
Asphaltes	Asphaltes coulés	20 à 50 mm	L'asphalte coulé est un mélange dense de bitume mélangé à un filler et/ou à de fines particules de calcaire et/ou d'asphalte naturel et/ou de sable.
Béton bitumeux dense	BBSG (<i>Béton Bitumineux Semi-Grenu</i>)	60 mm	Très utilisé en France pour les couches de roulement.
	BBME (<i>Béton Bitumineux à Module Elevé</i>)	> 50 mm	Taux de liant plus élevé dans ce type de béton, ce qui permet d'élever la résistance aux poids lourds.
	SMA	25 à 40 mm	Le SMA ("Splitt Mastic Asphalt" ou "Stone Mastic Asphalt", littéralement "Pierres enrobés d'un mastic bitumineux"), compromis entre le béton bitumineux dense et le béton bitumineux drainant, est particulièrement résistant aux efforts tangentiels et à l'orniérage, mais il s'avère plus pointu à formuler et plus coûteux à l'achat. Il ne doit pas être confondu avec le "Stone Mastic Asphalt" utilisé au Royaume Uni qui est une version plus ouverte du BBTM français.
Béton bitumineux "non dense"	BBDr (<i>Béton Bitumineux Drainant</i>)	30 à 50 mm	En anglais " <i>Porous Asphalt</i> ", le BBDr est un béton bitumineux avec une teneur en vide importante (> 20%) alors que les enrobés denses ont une teneur en vide de l'ordre de 6 %
	BBM (<i>Béton Bitumineux Mince</i>)	30 à 50 mm	En général, ce sont des produits avec une discontinuité granulométrique qui a pour effet indirect d'avoir une porosité importante proche des revêtements drainants
	BBTM (<i>Béton Bitumineux Très Mince</i>)	20 à 25 mm	
	BBUM (<i>Béton bitumineux Ultra Mince</i>)	15 à 20 mm	La différence avec un BBTM s'exprime par une notion de dosage moyen au m ² , plus significative qu'un critère d'épaisseur. Le BBUM est moins riche en sable que le BBTM.
	Enrobés phoniques	20 à 40 mm	Bétons bitumineux minces ou très minces, composés de granulats de petite dimension (0/4 ou 0/6 mm), intégrant dans leur formulation une discontinuité granulaire et un liant à propriétés viscoélastiques renforcées.

Tableau 2.1 : Principaux types de revêtements de chaussée exploités en France utilisant le bitume comme liant principal.

2.1. Eléments d'amélioration des performances acoustiques

Dans les travaux de recherche mis en œuvre dans la cadre du développement des performances mécaniques et acoustiques des revêtements de chaussée, une attention particulière est portée sur une série de paramètres ayant une influence significative sur la génération du bruit de contact pneumatique / chaussée : le type de revêtement, la texture de surface, l'intégration d'élastomères, le calibre des granulats, l'intensité du trafic routier, la teneur en vides... (cf. figures 2.2 et 2.3).



Figure 2.2 : Eléments d'amélioration des performances acoustiques, [2].

La figure 2.3 synthétise les principales causes de génération de bruit pneumatique / chaussée et les solutions de traitement associées. Les différents éléments d'améliorations sont détaillés aux §2.1.1 à 2.1.3.

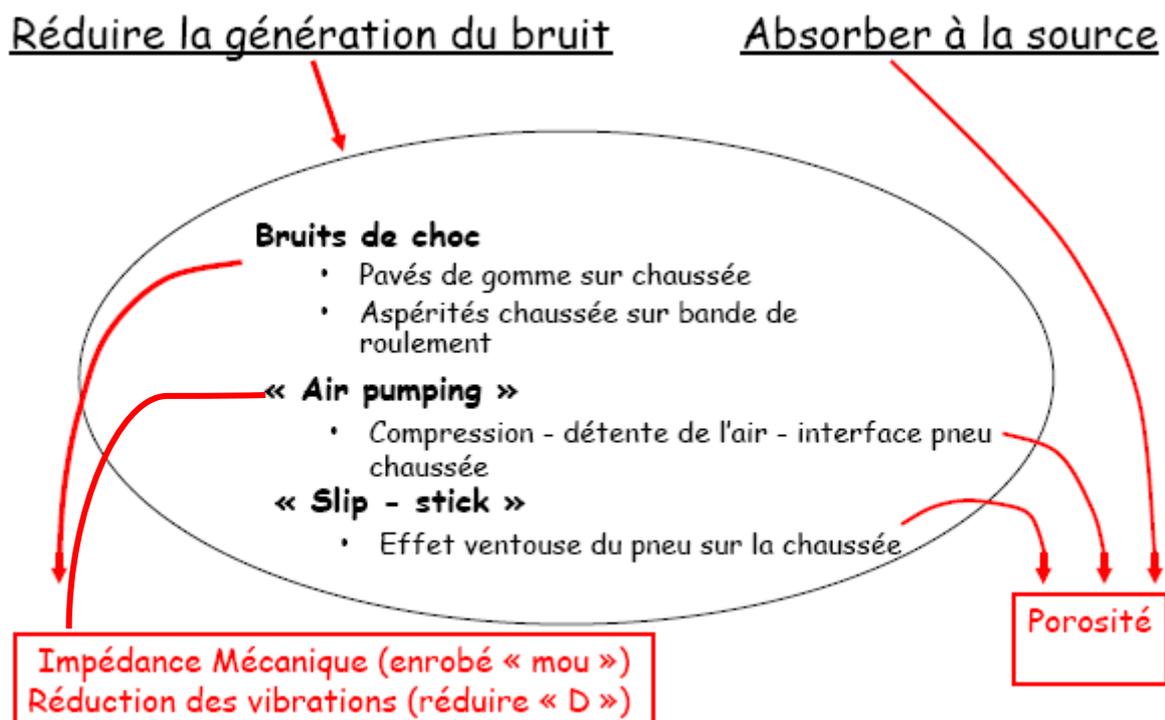


Figure 2.3 : Synthèse des principales causes de génération de bruit pneumatique / chaussée et solutions de traitement associées (source : COLAS).

2.1.1. Teneur en vide et discontinuité granulaire

Une teneur en vides communicants élevée permet de disposer d'une bonne capacité d'absorption acoustique. Les propriétés de porosité peuvent être améliorées par une discontinuité dans la sélection de la taille des granulats ou l'intégration de matériaux poreux.

2.1.1.1. Discontinuité granulaire

Afin de différencier les tailles de granulats présents dans les produits on utilise une codification. Par exemple, les spécifications "0/6" et "0/10" correspondent à une classe de granulométrie du béton dont les compositions comportent respectivement des granulats de diamètre compris entre 0 et 6 mm et entre 0 et 10 mm. La qualité granulaire permet d'optimiser la résistance d'un béton en optimisant la compacité du mélange granulaire. Cette condition est vérifiée lorsqu'une composition possède tous les diamètres de granulats.

L'évolution technique des produits tend vers des courbes granulométriques présentant des discontinuités correspondant à une quasi absence d'une classe granulaire. L'absence d'une classe granulaire a été développée à l'origine pour minimiser l'épaisseur du revêtement. C'est pourquoi, ces produits sont très présents dans les familles de béton bitumé mince et très mince.

En éliminant une classe granulaire intermédiaire, les performances du produit en termes de compacité ont été nettement améliorées sans nuire aux propriétés mécaniques du revêtement. Ce procédé a également favorisé la création d'interstices, améliorant la porosité du revêtement et donc des performances en termes d'absorption acoustique ainsi que les propriétés d'adhérence. Les revêtements de chaussée les plus silencieux intègrent ce principe. A titre illustratif, les figures 2.4 à 2.6 présentent les courbes granulométriques de types de revêtements intégrant une discontinuité granulaire.

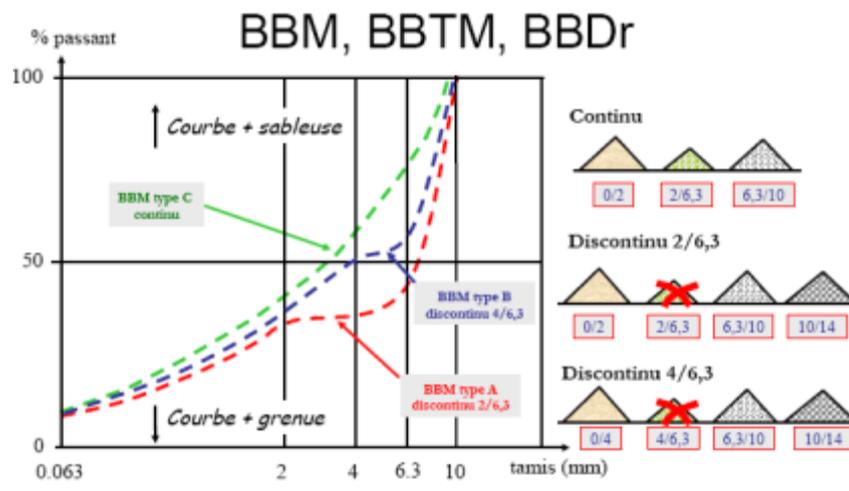


Figure 2.4 : Exemples de distributions granulaires de bétons bitumineux.

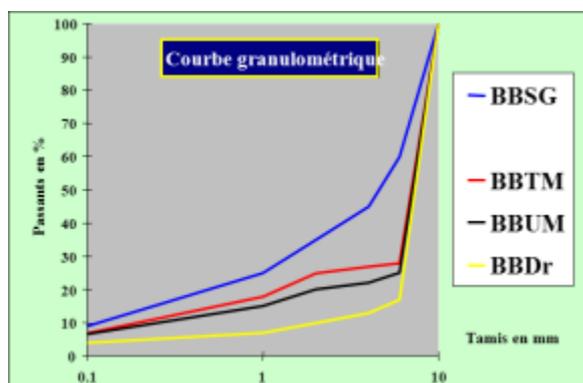


Figure 2.5 : Granulométrie d'un béton bitumineux drainant (BBDr).

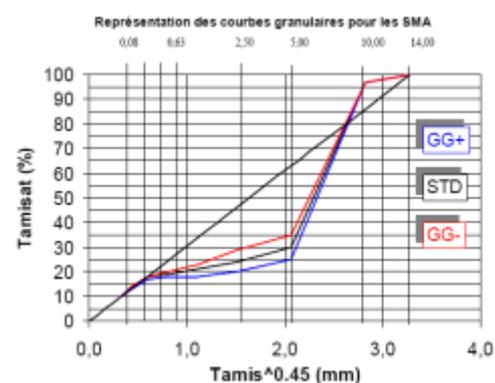


Figure 2.6 : Distribution granulaire des différents produits SMA.

2.1.1.2. Intégration de matériaux poreux

Des revêtements absorbants peuvent également être générés par l'adjonction de matériaux eux-mêmes poreux. Du matériel poreux supplémentaire est introduit dans certains types de revêtements (Italgrip, Microville, Miniphone, MillomHitex). Notamment, on y ajoute de l'argile soufflée (Blähton), des scories ou du tuff andésitique (Groupe Colas 2003, Nicholls 1998). Différents essais réalisés avec de "l'argile soufflée" ("expanded clay", Leca) aux USA, en Scandinavie et en Italie, ont montré que des réductions considérables du bruit pouvaient être atteintes de cette manière. Les mesurages effectués sur les autoroutes italiennes ont indiqué des diminutions du niveau sonore de 3,7 à 5,0 dB(A) en comparaison d'un béton bitumineux. Les matériaux durs et poreux présentent les avantages suivants : bonnes qualités antidérapantes, résistance à l'abrasion, agencement optimal les uns par rapport aux autres et avec le liant, absorption du son dans la mesure où les vides sont communicants [32].

Toutefois, d'autres études infirment ces résultats et montrent les limites de cette approche. Des essais effectués par le Centre de Recherches Routières (belge) (CRR), notamment sur une autoroute près d'Anagni en Italie dans le cadre du projet SI.R.U.US, témoignent du fait que l'addition d'argile soufflée n'a pas d'influence significative sur les performances acoustiques. Ce constat repose sur le fait que les "micropores" des granulats en argile soufflée sont très rapidement colmatés, d'où un effet acoustique non significatif [55].

De nombreux types récents de revêtements contiennent du caoutchouc (Colsoft, BBTM Acoustic RM®...), dont l'usage conduit souvent à un gain acoustique supplémentaire à l'état initial de l'ordre de 2 dB(A).

2.1.2. Réduction de la taille des granulats

La macrotexture peut avant tout être influencée par le choix des calibres de granulats. Dans la gamme des revêtements peu bruyants et en particulier les bétons bitumineux très minces (BBTM), une forte tendance à la réduction de la granularité est observée. Le calibre du plus gros granulat est en général de 4 à 6 mm. Les calibres 2/4 et 3/4 sont recommandés pour le gravillonnage de l'asphalte coulé dans plusieurs études [2, 36, 37, 38].

La réduction de la taille de granulat doit tenir compte de certaines propriétés de la de la roche :

- résistance au polissage sous l'effet du trafic (Coefficient de Polissage Accéléré, noté couramment en anglais PSV¹⁸),
- résistance à l'usure par attrition du granulat, évaluée par le coefficient MDE¹⁹.

Les expérimentations sur chantier ont démontré que la réduction de la granulométrie des enrobés avait aussi un effet sur la résistance à la glissance. Ainsi, les têtes acérés des petits gravillons juxtaposés contribue à la microtexture et rend moins nécessaire l'emploi d'une roche à forte résistance au polissage (PSV) à condition que la roche mère ait une bonne résistance à l'usure par attrition (MDE).

L'étude suisse [2] constate une tendance marquée au développement des revêtements en couches minces. L'objectif initial reposait principalement sur la quantité restreinte de matériaux nécessaire à leur construction, car plus la taille maximale du granulat d'un revêtement est petite, plus les couches mises en œuvre peuvent être fines. Cet aspect rend ces revêtements à la fois financièrement attractifs et plus faciles à renouveler lorsque la limite de la durée de vie acoustique est atteinte. Toutefois cette approche nécessite en contrepartie la mise en œuvre d'une couche d'accrochage de qualité nettement supérieure.

La réduction de la taille des granulats s'accompagne également d'une tendance significative à la réduction du bruit de contact pneumatique / chaussée comme l'illustre la figure 2.7.

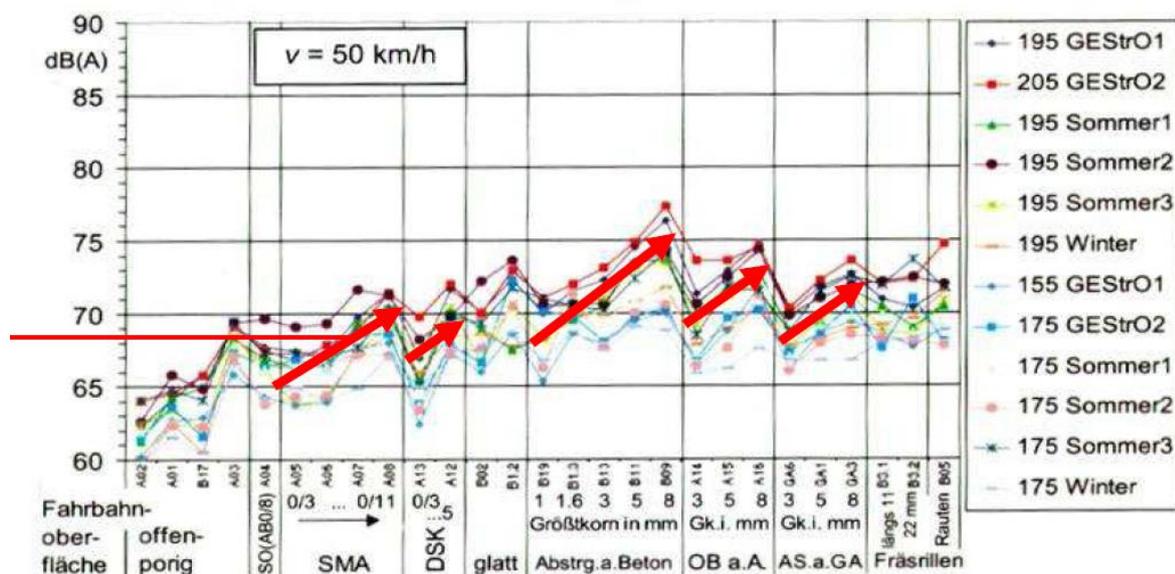


Figure 2.7 : Impact de la taille de granulat par type de produit, [2].

¹⁸ Couramment appelé en anglais "Polished Stone Value" (PSV), en français il s'agit du Coefficient de Polissage Accéléré, noté (CPA). Ce coefficient synthétise le résultat de l'essai en laboratoire destiné à simuler l'action de polissage des granulats par les pneumatiques des automobiles.

¹⁹ MDE : "Micro Deval en présence de l'Eau". La valeur du MDE synthétise le résultat de l'essai consistant à tester la résistance à l'usure par attrition du granulat. Le test consiste à soumettre les granulats à un cycle d'usure, en présence d'eau, par contact avec des billes d'acier à l'intérieur d'un cylindre en rotation.

2.1.3. Intégration d'élastomères

Des essais ont été réalisés avec plusieurs sortes de bétons bitumineux expérimentaux, en remplaçant une partie des granulats par des billes de caoutchouc ou en ajoutant de la poudrette de caoutchouc au mélange, mais aucune réduction de bruit significative n'a été observée. Une réduction de bruit majeure a cependant été mesurée avec les revêtements essentiellement composés de caoutchouc, comme les revêtements poroélastiques [3, 16]. Toutefois, ces types de revêtements se trouvent toujours au stade expérimental et toute une série de problèmes doit encore être résolue : résistance au feu, rugosité par temps pluvieux, longévité, adhérence à la couche inférieure.

2.1.4. Gains escomptés

Le tableau 2.2 synthétise les paramètres du revêtement de chaussée permettant une réduction du bruit de contact pneumatique / chaussée [2].

Paramètres	Description, Mesures	Potentiel de diminution du bruit
Microtexture	Pas de surfaces lisses, utilisation de matériaux minéraux anguleux.	1-3 dB(A) Surface lisse par rapport au BBTM de granularité fine.
Macrotexture	Dimensionner le revêtement pour atteindre de hautes amplitudes de longueur d'onde de texture entre 1-10 mm, et de basses amplitudes de longueur d'onde entre 16-50 mm. Le calibre de granulat optimal est de 3 mm pour les véhicules légers et 5 mm pour les poids lourds.	2-3 dB(A) Gain maximal 3mm, par rapport à 8 mm.
Mégatexture	Amplitudes aussi faibles que possible.	?
Surface à texture négative	Les surfaces compactées, à texture négative (convexe), sont meilleures que les surfaces gravillonnées, à texture positive (concave).	3-5 dB(A) Comparaison surface lisse / gravillonnée.
Porosité et perméabilité	Les revêtements ouverts ou drainants absorbent à la fois les bruits de roulement et de moteur.	ca. 4 dB(A) par rapport à surface dense peu bruyante.
Viscoélasticité, amortissement interne	Les revêtements viscoélastiques dotés d'un amortissement interne élevé sont plus silencieux. Utilisation de poudrette de caoutchouc.	2 dB(A) Comparaison enduit superficiel et béton de ciment.
Poroélasticité	Les revêtements au stade d'essai contiennent 40-95% de caoutchouc additionné et une teneur en vides de 25-40%. Revêtements "poreux" et absorbants, dont la viscoélasticité empêche l'incrustation des salissures.	7-12 dB(A)

Tableau 2.2 : Influence des paramètres du revêtement de chaussée ayant une influence sur le bruit, [2].

Les gains escomptés sont significatifs, de 1 à 5 dB(A) comme en témoignent les figures 2.8 et 2.9.

Paramètres de la réduction du bruit	
Paramètres	Potentiel de réduction du bruit (<i>non cumulable</i>)
Pas de surface lisse	1 à 3 dB(A) <i>(finement grenu comparé à lisse)</i>
Petit calibre de granulat	2 à 3 dB(A) <i>(3 mm comparé à 8 mm)</i>
Texture de surface négative	3 à 5 dB(A) <i>(surface compactée comparée à surface gravillonnée)</i>
Surface poreuse et perméable	environ 4 dB(A) <i>(surface drainante comparée à surface dense peu bruyante)</i>
Constituants minéraux poreux	?
Elasticité / atténuation propre au revêtement	2 dB(A) <i>(asphalte gravillonné comparé à béton gravillonné)</i>

Figure 2.8 : Synthèse de l'influence des paramètres du revêtement de chaussée ayant une influence sur le bruit, [2].

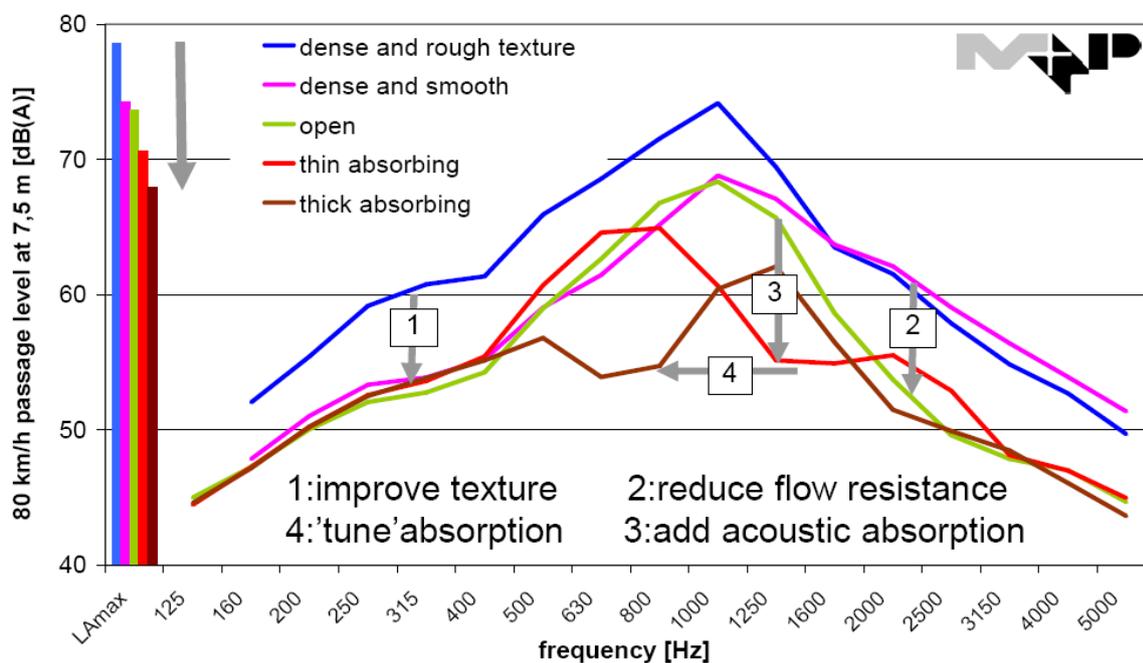


Figure 2.9 : Paramètres de réduction du bruit, analyse spectrale, [9].

2.1.5. Constitution d'un revêtement de chaussée "silencieux"

Dans leur ouvrage de base [6], Sandberg et Ejsmont définissent un "revêtement silencieux" comme suit : "Un revêtement silencieux est un revêtement qui, lorsqu'on fait rouler un pneu dessus, génère un bruit inférieur d'au moins 3 dB(A) par rapport aux types de revêtements routiers généralement utilisés". Les paragraphes précédents permettent de poser quelques règles élémentaires associées à la conception d'un revêtement "silencieux". Les développements associés à l'amélioration des performances acoustiques portent sur l'ensemble des caractéristiques influant significativement sur le bruit de roulement :

- le revêtement de chaussée doit comporter une structure de surface homogène et avoir le moins possible d'irrégularités de grande dimension afin d'éviter les phénomènes de vibrations des pneumatiques ;
- les surfaces cylindrées (compactées au rouleau) sont significativement moins bruyantes que les surfaces comportant un gravillonnage superficiel ;
- le revêtement ne doit pas être lisse mais au contraire présenter des aspérités de petite taille horizontale (< 1 cm) en quantités suffisantes. La granularité doit être fine, si possible inférieure à 8 mm. L'idéal est une granularité de 3 à 5 mm. Une texture ouverte (avec peu de sable) favorise la circulation de l'air et diminue ainsi l'effet de pompage d'air ;
- le revêtement doit également avoir une bonne porosité (teneur en vides communicants élevée) afin de disposer d'une bonne capacité d'absorption acoustique (réduction du bruit généré par les phénomènes aérodynamiques de pompage d'air). L'absorption du son augmente avec l'épaisseur de l'enrobé ;
- les revêtements qui disposent de bonnes propriétés viscoélastiques permettent d'amortir les vibrations du pneumatique et donc d'absorber le bruit de manière mécanique. L'introduction de polymères dans le revêtement permet de renforcer sa viscoélasticité ;
- les couches inférieures doivent présenter une bonne stabilité : bien que le bruit de roulement soit dû au contact entre les pneumatiques et la couche supérieure de la chaussée, les couches inférieures ont également une grande importance pour éviter les nuisances sonores. Si l'assise est instable, la couche supérieure ne tardera pas à se fissurer et à se fragmenter, générant ainsi un bruit de roulement excessif ;

Par ailleurs, afin que les performances acoustiques puissent se maintenir dans le temps, d'autres facteurs entrent en considération :

- l'introduction de filler spécial à fort pouvoir rigidifiant dans le revêtement permet d'éviter les déformations plastiques d'origine thermique ou mécanique,
- l'introduction de liants à fort pouvoir cohésif dans le revêtement permet d'éviter l'arrachement de granulats et donc de maintenir dans la durée la rugosité de surface.

Des solutions adaptées à chaque phénomène physique participant au bruit de contact pneumatique / chaussée existent. Nous détaillons ci-après celles permettant des réductions significatives des phénomènes de vibrations, d'air pumping et de l'effet dièdre.

2.1.5.1. Réduction des vibrations

Afin de réduire les vibrations génératrices de bruit, il convient de réduire à la surface les grandes aspérités et irrégularités. Ceci peut être réalisé par la réduction du calibre des granulats dans le revêtement, des précautions en matière de mise en œuvre et de maintenance. Les aspérités de surface ayant des largeurs supérieures à 1 mm (famille macrotexture jusqu'à 50 mm) et les irrégularités de surface de grande dimension horizontale (supérieure à 5 cm typiquement famille megatexture) sont les causes majeures des vibrations. Plus le nombre et la profondeur des macro-irrégularités et des méga-irrégularités sont réduits, plus le phénomène de vibrations est atténué.

La réduction du calibre de granulat du revêtement permet de réduire la dimension horizontale des macro-irrégularités et donc de réduire la vibration des pneumatiques. Pour éviter les méga-irrégularités génératrices de vibrations des pneumatiques et de la carrosserie du véhicule, il faut éviter les revêtements de type pavé ou dalle. Les erreurs commises lors de la construction du revêtement peuvent aussi être à l'origine de méga-irrégularités. Les ondulations assez fréquentes sur les surfaces en béton sont dues au mauvais lissage du béton encore humide et constituent un exemple type de ce genre d'erreur. Les méga-irrégularités peuvent également se créer par des phénomènes d'usure : creux, fissures... D'où l'importance de veiller au bon entretien et à une maintenance régulière de la chaussée. La forme du relief de surface joue également un rôle important. Il faut privilégier une surface compactée à texture négative qui permet de diminuer les vibrations par rapport à une surface gravillonnée à texture positive.

2.1.5.2. Amortissement des vibrations

L'amortissement réduit l'amplitude des vibrations. Les propriétés d'amortissement du revêtement peuvent être améliorées par une composition du liant spécifique (polymères par exemple) et/ou l'adjonction d'élastomères (caoutchouc). Les enrobés dans lesquels des adjuvants comme des polymères sont rajoutés possèdent un comportement plus viscoélastique et sont dotés d'un amortissement interne élevé. Ces types de revêtements engendrent un bruit plus sourd et moins sensible à l'oreille humaine.

2.1.5.3. Atténuation du phénomène d'air pumping

Une réduction significative du bruit associé au phénomène d'air pumping peut être obtenue en augmentant les petites aspérités de surface (réduction du calibre de granulats) à la surface du revêtement et en augmentant les propriétés de porosité du revêtement de chaussée.

Les aspérités de surface de petite dimension horizontale (inférieure à 1 cm typiquement) de la famille des "macro-irrégularités" sont par contre nécessaires pour réduire le phénomène de pompage d'air. L'air piégé dans les alvéoles des pneumatiques peut en effet librement s'échapper horizontalement entre les irrégularités avant d'être comprimé et il n'y a pas, pour cette même raison, d'effet d'aspiration bruyant à l'arrière de la zone de contact. Les macro-irrégularités s'obtiennent généralement en utilisant de petits granulats à la surface. Les enrobés à faible granulométrie permettent ainsi de réduire fortement les bruits liés au phénomène de compression/détente d'air piégé. L'effet de pompage d'air est également diminué par utilisation de revêtements drainants caractérisés par la présence de trous en surface reliés aux vides présents dans la structure du revêtement (minimum 15 % de vides). L'expulsion et l'aspiration de l'air se déroulent alors verticalement et de façon silencieuse, *via* les trous du revêtement.

2.1.5.4. Atténuation de l'effet dièdre

Une réduction du phénomène d'amplification (effet dièdre) peut être mise en œuvre en améliorant les propriétés d'absorption du revêtement de chaussée. Ce qui revient à augmenter la porosité du revêtement afin de créer des interstices d'air reliés entre eux (recours à une discontinuité granulométrique)

Les caractéristiques drainantes ou poreuses d'un revêtement permettent en outre d'absorber les bruits de roulement et de réduire de manière importante l'effet de corne ; l'énergie sonore est partiellement transformée en chaleur dans les vides. Elles permettent en outre de réduire le surcroît de bruit généré par le phénomène de projection de gouttelettes d'eau, lorsqu'il pleut ou qu'il vient de pleuvoir. Enfin, une bonne absorption acoustique contribue à absorber également le bruit du moteur (qui est dominant à vitesse peu élevée).

2.2. Les différentes technologies

La plupart des routes est revêtue d'un revêtement de chaussée appartenant à l'un des types suivants : bétons bitumineux, bétons de ciment, pavés, enduits superficiels. En France les revêtements du type "béton bitumineux" sont majoritairement utilisés. Ce chapitre présente les différentes technologies présentant des performances acoustiques significatives : les enrobés drainants mono et double couche, les SMA, les bétons bitumineux minces et très minces.



2.2.1. Revêtements de chaussées classiques

La plupart des routes ont un revêtement de chaussée qui appartient à l'un des types suivants : béton bitumineux, béton de ciment, pavés. Une quatrième technique complémentaire consiste à appliquer un enduit superficiel sur une base de revêtement existant.

2.2.1.1. Bétons bitumineux

Les bétons bitumineux se composent d'un mélange de granulats, de sable, de fillers et de bitume en guise de liant. Ils sont en général assez résistants et capables de bien répartir le poids des poids lourds sur la couche inférieure. Ils possèdent d'ordinaire une viscoélasticité supérieure à celle du béton de ciment. Dans un béton bitumineux classique, on utilise du sable (faible granulométrie) et des granulats de granulométrie plus élevée.

Combinés au liant, le sable remplit la plupart des vides formés entre les granulats de granulométrie plus élevée. Il subsiste 3 à 5 % de vides qui ne sont pas communicants. Ce type de béton bitumineux

est appelé béton bitumineux dense (BB) et est souvent pris comme base de référence de comparaison. La figure 2.10 propose une représentation schématique du béton bitumineux classique.

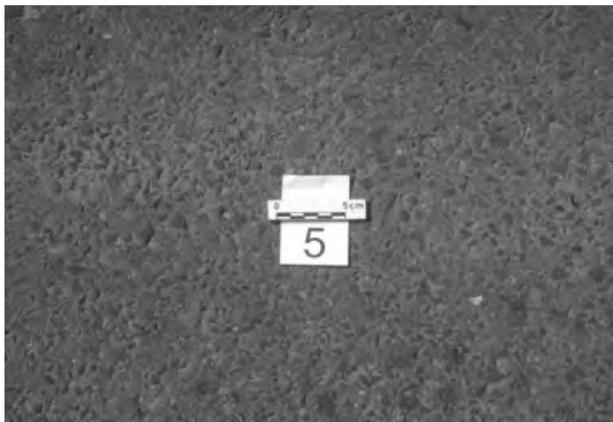


Figure 2.10 : Béton bitumineux classique, [3].

Il existe de nombreuses autres sortes de bétons bitumineux :

- les bétons bitumineux à module élevé (BBME), dans lesquels un liant dur spécialement formulé avec un dosage plus important permet un meilleur compromis entre la durabilité et la résistance au trafic des poids lourds ;
- Le SMA ("*Stone Mastic Asphalt*", littéralement "Pierres enrobés d'un mastic bitumineux"), compromis entre le béton bitumineux dense et le béton bitumineux drainant, est particulièrement résistant aux efforts tangentiels et à l'orniérage, mais il s'avère plus pointu à formuler et plus coûteux à l'achat ;
- les bétons bitumineux drainants (BBDr) : dans ce genre de béton bitumineux ne sont utilisés que des granulats plutôt gros et le bitume ne remplit pas les vides laissés entre les granulats. Il subsiste ainsi de nombreux vides (20 à 25 %) qui sont reliés entre eux. Lors de la pose d'un béton bitumineux drainant, il faut prévoir une couche étanche sous la couche supérieure en BBDr afin de protéger les couches inférieures de la route contre l'infiltration d'eau (cf. §2.2.3) ;
- les bétons bitumineux minces : cette technique a été développée au départ pour réparer un revêtement routier usé, à certains endroits ou sur toute la surface. Des granulats de granulométrie réduite sont utilisés. On distingue plusieurs sous-catégories en fonction de l'épaisseur (cf. §2.2.4).

2.2.1.2. Bétons de ciment

Le béton de ciment présente de nombreuses similitudes avec le béton bitumineux, à la différence que l'on utilise du ciment en guise de liant et non du bitume. Une autre différence réside dans le fait que le béton de ciment comporte une plus grande proportion de sable. Le matériau est donc plus compact et la surface plus lisse, ce qui peut poser problème par temps de pluie où la surface a tendance à devenir glissante.



Des traitements spéciaux sont souvent appliqués pour résoudre ce problème en créant une certaine texture (macrotexture) :

- brossage de la surface en béton encore humide,
- passage d'un peigne métallique ou mise en place d'une toile de jute sur la surface en béton fraîchement posée²⁰ (cf. figure 2.11),
- rainurage du béton durci à l'aide d'une scie diamant ou d'une série de disques diamants très rapprochés²¹ (cf. figure 2.12),
- bouchardage de la surface à l'aide d'un marteau à pointes²²,
- traitement chimique de la surface²³ (cf. figure 2.13)...



Figure 2.11 : Texture de surface après passage d'un peigne métallique, [3.]



Figure 2.12 : Texture de surface après rainurage du béton durci à l'aide d'une scie diamant, [3.]

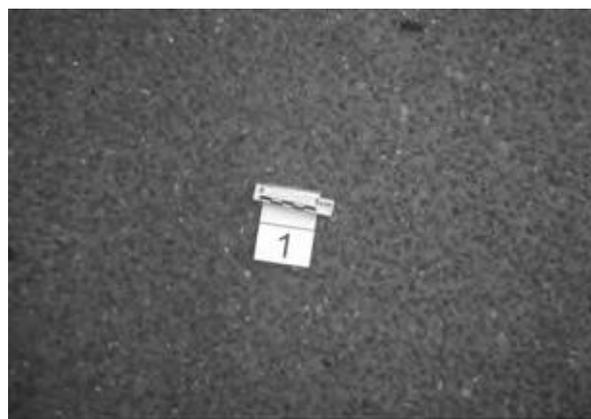


Figure 2.13 : Texture de surface après traitement chimique de la surface, [3].

²⁰ Les dents sont réparties de façon régulière ou irrégulière, ce qui constitue une meilleure option pour éviter un bruit de roulement tonal. Les rainures ainsi réalisées ont une largeur de 2 à 5 mm, une profondeur de 3 à 5 mm et sont distantes de 10 à 40 mm les unes des autres. Le peignage du béton est souvent combiné à un brossage ou au passage d'une toile de jute.

²¹ Stries sont généralement plus profondes et plus larges que celles résultant d'un "peignage"

²² Les éléments plus tendres de la surface sont éliminés et on obtient une surface où les éléments plus durs (petits cailloux) font saillie.

²³ Le sable présent entre les granulats à la surface du béton frais est éliminé à l'eau. Le résultat est aussi appelé béton antibruit.

Les revêtements de chaussée en béton de ciment étaient auparavant réalisés en plaques distinctes de 10 à 20 m de long, contrairement aux revêtements en béton bitumineux. En raison de son manque de flexibilité, le béton peut en effet se rompre sous l'effet des dilatations thermiques. Les joints entre les plaques de béton engendraient un bruit caractéristique ("poudoum") lors du passage des véhicules. Ces joints de dilatation sont aujourd'hui superflus grâce à l'amélioration des techniques d'armement. On parle à présent de "béton armé continu".

Le béton non armé est encore appliqué, mais en dalles plus courtes (5 à 10 m), qui permettent de réduire l'épaisseur des joints, ce qui produit un effet favorable sur les performances acoustiques. Afin d'éviter des affaissements, les dalles sont interconnectées avec des goujons.

2.2.1.3. Pavés

Il s'agit d'un revêtement composé d'éléments distincts de petite dimension appareillés entre eux pour former une surface plane et homogène. Ces éléments sont reliés entre eux par des joints. Ils sont souvent posés de manière à former des motifs. Les pavés béton font partie des revêtements dotés d'une mégatexture intrinsèque et d'une macrotexture réduite (sauf en cas de pose spéciale).



On distingue les pavés en pierre naturelle (granits ou porphyres taillés en forme de cubes généralement - cf. figure 2.14) des pavés artificiels fabriqués généralement en béton de ciment ou en terre (cf. figure 2.15). Les pavés artificiels présentent parfois une forme plus complexe, qui permet de les imbriquer les uns dans les autres, ce qui assure une meilleure stabilité. Ils ont généralement une face supérieure plate contrairement à celle des pavés en pierre naturelle. Des granulats sont parfois ajoutés sur la face supérieure lors de la fabrication pour leur donner une macrotexture.

Très employés autrefois pour leur résistance, l'utilisation actuelle de pavés naturels est en grande partie motivée par des raisons historiques, culturelles ou esthétiques. Ils sont à bannir sur le plan acoustique.



Figure 2.14 : Pavés en pierre naturelle, [3].

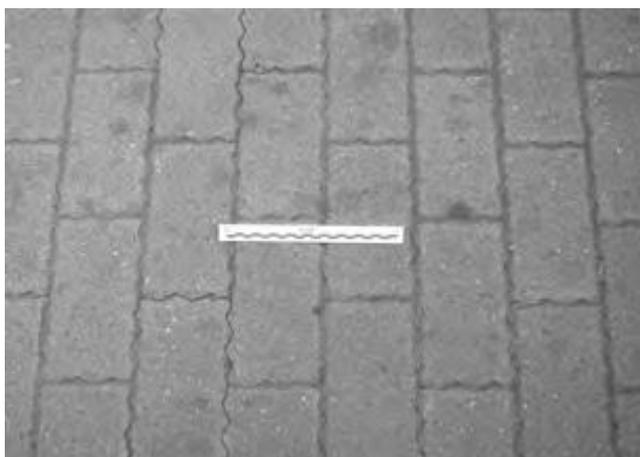


Figure 2.15 : Pavés artificiels, [3].

On peut éviter qu'un revêtement en dalles, en pierre naturelle, ou pavés artificiels, soit trop bruyant en observant quelques règles de base [50] :

- l'épaisseur des joints doit être inférieure à 12 mm s'ils sont transversaux par rapport à la direction de roulement ou inférieure à 8 mm s'ils sont perpendiculaires,
- la distance entre les joints doit être supérieure à 150 mm,
- le nombre de pavés par m² doit être inférieur à 36,
- les amplitudes des irrégularités (longueur d'onde entre 2 et 20 cm) sur les surfaces des pavés doivent être inférieures à 1 mm.

2.2.1.4. Enduits superficiels

Cette technique consiste à étendre sur une couche inférieure plane et en bon état, une couche de granulats collée directement grâce à un liant, par exemple bitume ou époxy (cf. figure 2.16). C'est ce qu'on appelle un enduit monocouche ; celui-ci a une épaisseur de 5 à 15 mm. Il est possible de répliquer l'opération pour réaliser un enduit bicouche. Il est tout à fait possible de combiner un enduit à un autre type de revêtement et d'apposer, par exemple, un enduit superficiel sur une surface en béton de ciment.

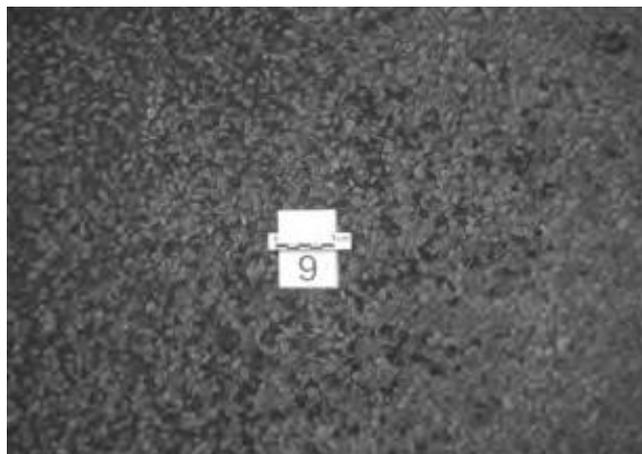
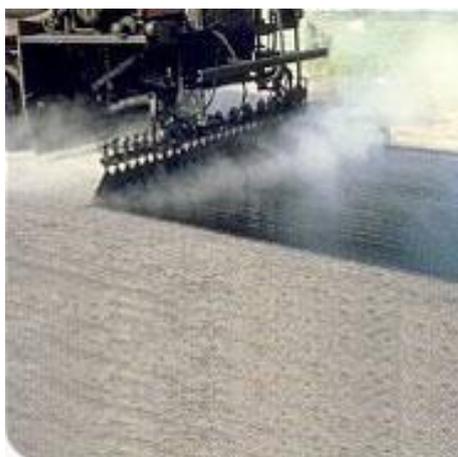


Figure 2.16 : Enduit superficiel, [3].

2.2.1.5. Asphalte coulé

L'asphalte coulé est un type de revêtement traditionnel, épais, saupoudré grossièrement et cylindré. Il est constitué par un mélange à chaud en proportions variables de bitume, filler (ou fines), sable et granulats. La propriété fondamentale de l'asphalte est de pouvoir être mis en œuvre par coulée à chaud. Il s'ensuit une compacité du revêtement qui acquiert son état final par simple refroidissement. Il est fabriqué dans des unités de fabrications modernes automatiques qui mélangent, chauffent, malaxent tous les éléments naturels de base et obtiennent ces produits finis qui sont ensuite transportés dans des camions porteurs, malaxeurs dans les meilleures conditions de sécurité et de rapidité.

L'asphalte coulé bénéficie grâce à la stabilité de ses propriétés physiques, d'un vieillissement lent. Il présente ainsi la particularité d'être couramment utilisé en ville pour la réalisation des surfaces de trottoirs ou de parking. Il constitue également une solution pour la confection d'un revêtement de chaussée.

L'asphalte moderne présente des avantages suivants : matériau performant, recyclable, non polluant, résistance à l'usure, ininflammabilité, non glissante, résistance à de nombreux produits chimiques, utilisable dès le refroidissement.



source : <http://www.asphaltes.org>.

2.2.2. Le SMA

Le SMA ("Splitt Mastic Asphalt" ou "Stone Mastic Asphalt", littéralement "pierres enrobés d'un mastic bitumineux") est un compromis entre le béton bitumineux dense et le béton bitumineux drainant (cf. §2.2.3). Il s'agit d'un enrobé bitumineux, à granularité discontinue contenant une forte proportion de granulat et un fort taux de filler. Les granulats concassés forment le squelette rigide du produit. Les fines, le sable 0/2 ou 0/3, les fibres et le bitume sont mélangés pour obtenir un mastic ou mortier bitumineux qui remplit le vide intergranulaire. L'addition aux granulats du mortier bitumineux forme le SMA (cf. figure 2.17). Les particularités de cet enrobé sont un fort taux de bitume (aux environs de 7%) et un faible pourcentage de vide (entre 2 et 6%). Il ne doit pas être confondu avec le "Stone Mastic Asphalt" utilisé au Royaume-Uni qui est une version plus ouverte du BBTM français.

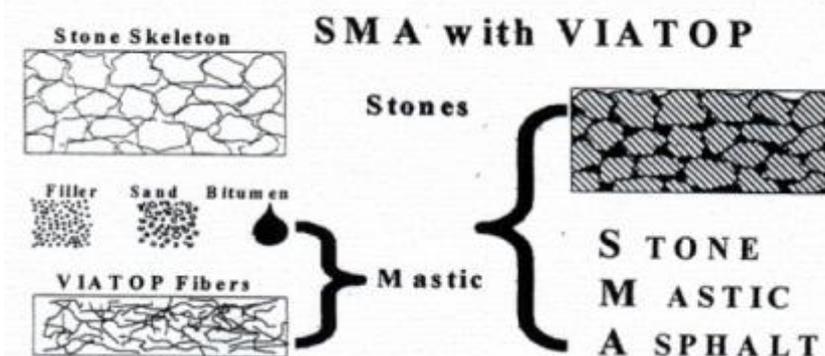


Figure 2.17 : Principe de composition du SMA, [10].

Ce revêtement est très populaire dans les pays du Nord de l'Europe en raison de sa durabilité apportée par des films épais de bitume et de sa résistance convenable à l'orniérage apportée par le contact grain sur grain des granulats. Le SMA a été développé il y a 25 ans en Allemagne pour résister à l'usure des pneumatiques cloutés et à l'agression chimique des produits de déverglaçage. La durée de vie limitée dans le temps des produits plus ouverts a rendu très populaire l'utilisation des SMA en Europe du nord. Le SMA est plus résistant aux efforts tangentiels que les enrobés ouverts tels que les BBM ou les BBTM et plus performant à l'orniérage que les enrobés denses, mais il est plus pointu à formuler et plus coûteux à l'achat.

Le SMA est confectionné à chaud, à granulométrie discontinue, qui maximise le contenu en bitume et la fraction de gros granulats (cf. §2.1.1 figure 2.6). Cela produit un squelette stable pierre sur

Pierre, qui est maintenu en place par un mastic riche en bitume et en filler et comportant un agent stabilisant sous forme de fibres. Les granulats et les fines sont choisis de façon à ce que le matériau ne soit pas "poreux", mais à ce que la couche supérieure vue du dessus ait la même apparence que le béton bitumineux grenu. Il y a beaucoup de vides autour des granulats relativement gros qui se trouvent à la surface, mais le revêtement ne présente pas de structure ouverte ou drainante en raison de la grande quantité de fines utilisée.

Le SMA est utilisé en couche mince entre 25 et 40 mm. Les formulations avec des calibres de gravillons de 5 ou 6 mm ont une texture de surface optimisée pour faire moins de bruit. Ce type de revêtement réduit le niveau de bruit par rapport à un revêtement de référence (type enrobé dense 0/16) au maximum de 2 dB en contexte urbain. L'utilisation de granulats de plus grande taille peut rendre le produit beaucoup moins performant (une augmentation de 40% de la taille des granulats implique une augmentation du bruit de 1,5 dB(A) pour les VL).

2.2.3. Bétons bitumineux drainants (BBDr)

À l'origine, cet enrobé a été développé pour ses propriétés de drainage de l'eau (cf. figure 2.18). La principale différence avec le béton bitumineux classique réside dans le pourcentage de vides présent dans le revêtement. En effet, cette augmentation de la teneur en vide, basée sur une granulométrie discontinue, améliore considérablement les propriétés de drainage. Le pourcentage élevé de granulats de granulométrie 0/14 à l'exclusion des dimensions 2/7, engendre un volume important de vides (au moins 20 %). L'épaisseur est d'au moins 4 cm.



Figure 2.18 : Revêtements drainants,
(source : CERTU).

Ce pourcentage important de vide est à l'origine de l'absorption du bruit. La diminution obtenue des niveaux de bruit est comprise entre 3 et 9 dB(A) par rapport au béton bitumineux dense selon les contextes. Les BBDr peuvent être particulièrement adaptés pour réduire le bruit sur des voiries bordées de bâtiments des deux côtés (configuration en U ou canyon) dans la mesure où les capacités d'absorption du revêtement agissent sur le bruit supplémentaire généré par les réflexions du bruit incident sur les bâtiments. Outre ces capacités d'évacuation de l'eau sur la chaussée, la mise en œuvre de ce type de revêtement apporte :

- une réduction significative du bruit à moindre coût (solution relativement intéressante par rapport à d'autres solutions de correction acoustique : obstacles et isolation des façades),
- une réduction des pulvérisations de poussière et d'eau par temps de pluie (une meilleure visibilité),
- l'atténuation de l'effet d'éblouissement causé par les phares des véhicules la nuit et par temps de pluie,

- une amélioration de l'adhérence et de la sécurité (résistance au dérapage et réduction du phénomène d'aquaplaning),
- un potentiel impact positif sur la qualité de l'air par diminution du phénomène de remise en suspension des particules fines (point à conforter néanmoins car peu d'études encore disponibles à ce jour).

Les bétons bitumineux drainant présentent toutefois quelques inconvénients :

- les revêtements présentant une texture très ouverte comme les BBDr perdent progressivement leurs bonnes qualités acoustiques initiales, en raison de l'obstruction des vides (colmatage) par la boue, les particules, ou les matières huileuses d'une part, et du détachement d'agrégats de la couche supérieure d'autre part. L'évolution est très rapide dans certains cas et lente dans d'autres. Cela dépend des conditions de circulation notamment. Sur voirie rapide ou autoroutière (vitesse supérieure à 70 km/h), la vitesse élevée des véhicules génère un auto-nettoyage des vides qui maintient relativement bien dans la durée la performance acoustique de ce type de revêtement. En circulation urbaine, ce ne peut être le cas. L'efficacité de la solution consistant à procéder à des nettoyages réguliers (deux par an) à l'aide de machines spéciales pour contrer le risque de colmatage et éviter une dégradation rapide des performances acoustiques (environ 3 dB(A) après 4 ans) n'a à ce jour pas été démontrée. Les conclusions de l'étude suisse "Revêtements de routes peu bruyants à l'intérieur des localités" [2] sur le sujet ont montré, au bout de 6 ans, un important colmatage des vides de l'enrobé drainant mis en œuvre à Kreuzligen ; colmatage s'accompagnant d'une très nette diminution des performances acoustiques au cours des 2 dernières années, ceci malgré un nettoyage intensif au moyen d'un véhicule spécial. Dans le cadre de ses travaux de recherche du Centre de Recherches Routières (belge) (CRR), une différence de 1,4 dB(A) a été constatée après un nettoyage avec de l'eau à haute pression, mais le revêtement était assez abîmé... [53, 54].

- en cas de gel, l'eau emprisonnée dans les vides rend le revêtement plus glissant. En cas de neige ou de verglas, il est également moins aisé de déverglacer le revêtement, même si ce problème n'est pas insurmontable, comme le démontrent les Pays-Bas, où le béton bitumineux drainant est utilisé systématiquement sur le réseau routier principal ;

- les bétons bitumineux drainants sont moins résistants aux contraintes tangentielles qu'un revêtement classique : il est donc préférable de ne pas les utiliser aux carrefours, dans les ronds-points, les virages serrés...

- enfin, ces types de revêtements sont assez délicats à mettre en œuvre lors d'une réfection ponctuelle d'une chaussée non pourvue initialement d'enrobés drainants car ils nécessitent la mise en place d'un drainage et donc la réfection de l'intégralité des couches de roulement de l'ensemble des voies d'un tronçon.

On distingue 2 types de bétons bitumineux drainants : simple couche et double couche dont les caractéristiques communes et les spécificités sont explicitées aux §2.2.3.1 et §2.2.3.2.

Bien que la technique ne soit guère utilisée, il est possible d'obtenir une structure ouverte en utilisant du ciment en guise de liant : il est alors question de béton de ciment drainant. Nous ne détaillons pas ici la catégorie des bétons de ciment drainants qui sont très peu utilisés en France. Néanmoins leurs caractéristiques acoustiques et les avantages / inconvénients de ces revêtements sont assez proches des BBDr.

2.2.3.1. Béton bitumineux drainant simple couche

Les revêtements drainants ont en commun avec les SMA la structure du squelette en pierre, mais en raison de la faible quantité de mortier présent dans le produit, les vides ne sont pas fermés, mais ils forment des canaux ouverts à travers le matériau. La porosité de la surface et du produit en général donne à la route de bonnes propriétés d'absorption et de drainage de l'eau. L'absorption acoustique est l'une des explications potentielles justifiant les bons résultats du béton bitumineux drainant sur le plan acoustique.

Ce type de béton bitumineux est également identifié en anglais par "Porous Asphalt" dans la catégorie des bétons bitumineux minces. En effet, sur la base d'un béton bitumineux mince, les granulats "plus gros" sont presque exclusivement utilisés, ainsi le bitume ne remplit pas les vides laissés entre les granulats (cf. figure 2.19). Il subsiste ainsi de nombreux vides (20 à 25 %), qui communiquent les uns avec les autres (cf. figure 2.20). Ce produit est appelé béton bitumineux drainant (BBDr).



5 cm PA 0/16



Figure 2.19 : Béton bitumineux drainant (BBDr), [8].

Figure 2.20 : Béton bitumineux drainant (BBDr), [8].

L'effet de suppression du bruit est maximal quand la surface est lisse tout en ayant des trous (opposé de rugueux) pour éviter les effets de pompage. Il faut également que l'épaisseur soit bien définie pour maximiser les propriétés d'absorption et donc la réduction du bruit. Avec ce type de revêtements des réductions supérieures à 4 dB sont possibles. Outre la réduction du bruit de contact pneumatique / chaussée, ce phénomène d'absorption agit également sur le bruit moteur du véhicule aussi bien pour un véhicule en mouvement qu'à l'arrêt. Les figures 2.21 et 2.22 illustrent ce propos.

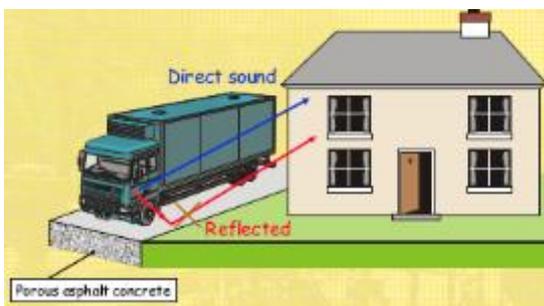


Figure 2.21 : Réduction du bruit lié à l'absorption des revêtements ouverts / drainants, [7].

Stationary vehicles with running engines

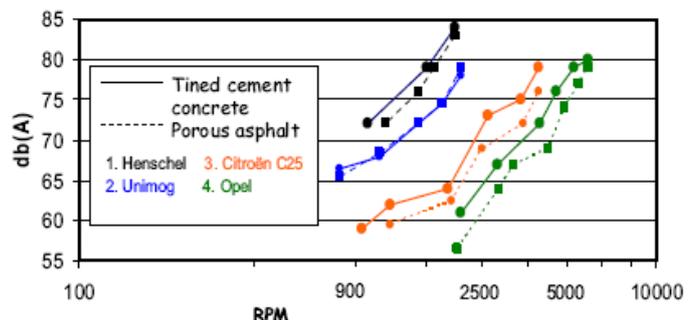


Figure 2.22 : Réduction du bruit lié à l'absorption des revêtements ouverts / drainants pour un véhicule à l'arrêt, [7].

D'autres explications possibles incluent la réduction de l'effet de pompage d'air, la diminution des vibrations des pneumatiques grâce à une meilleure texture superficielle, etc... Bien que le rôle précis de l'absorption acoustique reste mal défini et nécessite dès lors d'autres recherches, on tente d'optimiser l'absorption acoustique assurée par les revêtements ouverts ou drainants. Les efforts déployés en la matière visent une absorption maximale dans les sections pertinentes du spectre.

En France, on réalise des enrobés drainants très épais en milieu urbain²⁴. Le but poursuivi est double : lutter au mieux contre le bruit urbain et assurer un tampon provisoire pour l'eau de pluie en cas de violentes averses : on parle de "chaussées réservoirs".

2.2.3.2. Béton bitumineux drainant bicouche

Pour optimiser le béton bitumineux drainant (BBDr), il est recommandé d'utiliser des granulats de granulométrie plus réduite, ce qui rend le revêtement moins perméable et, à terme, moins sensible à l'obstruction des vides. C'est pour tendre vers cet objectif que le BBDr bicouche a été développé avec deux couches composées de granulats de dimensions différentes (cf. figure 2.23). Il est également identifié en anglais par "Twin-Lay" ou "Double Layer Porous Asphalt". Ce système a été expérimenté pour la première fois aux Pays-Bas en 1990.

Le BBDr bicouche offre un potentiel de réduction du bruit très important (de l'ordre de 5 à 7 dB(A)). Il doit cette qualité à la combinaison de propriétés absorbantes optimales avec une texture de surface finement grenue et compactée. Ce type de revêtement était assez largement utilisé dans plusieurs villes des Pays-Bas, ce qui n'est plus vrai aujourd'hui en raison des problèmes avérés de colmatage des vides. Aujourd'hui son application se limite dans ce pays à certains tronçons autoroutiers où l'on souhaite obtenir une réduction supplémentaire du bruit routier (cf. §3.3 - tableau 3.2).

Les BBDr bicouches reposent sur le principe d'appliquer une couche de BBDr de petite granulométrie sur une couche de BBDr de granulométrie plus élevée. La couche supérieure finement grenue était destinée à l'origine à agir tel un filtre contre le colmatage (ce qui s'est avéré par la suite inexact). Sa surface compactée offre une couche de roulement finement grenue qui minimise la vibration des pneumatiques. Le fait de disposer d'une couche épaisse de BBDr offre une bonne absorption acoustique (la structure en deux couches élargit le spectre d'absorption du son) qui agit à la fois sur les bruits de roulement et de moteur. L'un des problèmes inhérents au BBDr bicouches résidait dans la difficulté à assurer une adhérence correcte entre les deux couches. Ce problème est aujourd'hui résolu avec la mise en œuvre de la technique "chaud dans chaud" consistant à poser la couche supérieure sur la couche inférieure chaude. Précisons que la pose de la couche supérieure exige un grand savoir-faire technique.

Parallèlement au risque de colmatage, on cherche également à optimiser l'absorption du bruit des revêtements bicouches, de telle sorte que leur spectre d'absorption coïncide au mieux avec celui des émissions. De vastes modèles ont été développés à ce sujet [28]. En outre, de nouvelles solutions ont été développées pour assurer l'évacuation des eaux en bordure de route.

²⁴ La comparaison des spectres acoustiques de véhicules roulant à 120 km/h sur différents types de revêtements routiers (asphalte dense 0/16 mm, BBDr monocouche 6/16 et 4/8 et BBDr bicouche 4/8 sur 6/16) démontre que les BBDr offrent une réduction pratiquement constante dans la gamme de fréquences (630-4000 Hz) par rapport à l'asphalte dense.

L'absorption joue un rôle si le pic d'absorption est bien placé (à un niveau de basse fréquence suffisant). Si ce n'est pas le cas, l'absorption joue un rôle marginal et la réduction de bruit due au BBDr peut être imputée à l'absence de pompage d'air par les pneumatiques. Sur un revêtement ouvert ou drainant, l'air peut en effet se faufiler verticalement à travers les vides sans être comprimé et sans s'échapper de nouveau (bruyamment). Sur un revêtement non ouvert, mais doté d'une macrotexture suffisante, l'air peut s'échapper horizontalement et le phénomène de pompage d'air ne se produit pas non plus.

A l'origine, cette solution était destinée être utilisée à des vitesses relativement basses, car le risque de remplissage des vides était supposé réduit en raison de la présence de la première couche qui devait agir comme un filtre. Cependant le processus d'autonettoyage n'étant effectif qu'à partir de 70 km/h et le recours à des nettoyages périodiques à l'aide de machines spéciales pour contrer le risque de colmatage n'étant pas démontré à ce jour, l'utilisation de ce type de revêtement dans le domaine des faibles vitesses en milieu urbain n'est aujourd'hui plus plébiscité.

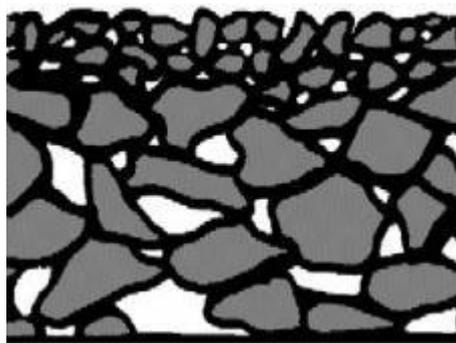


Figure 2.23 : Béton bitumineux drainant bi-couche, [8].

2.2.4. Bétons bitumineux minces (BBM), très minces (BBTM) et ultra minces BBUM

Précisons en préambule que ces types de revêtements de chaussée présentent un intérêt considérable au niveau international. Ils ont d'ailleurs fait l'objet d'une étude détaillée dans le cadre du projet ERANET ROAD "OPHTHALM". Ce projet récent (achevé en 2011) rend compte de la quasi-totalité des informations disponibles dans le monde sur ce sujet [48, 49].

Parallèlement au béton bitumineux mince traditionnel, non ouvert, qui peut servir à réparer un revêtement, il est possible de réaliser des bétons bitumineux minces ouverts. Financièrement attractifs (du fait de la quantité restreinte de matériel nécessaire à leur construction) et faciles à renouveler, on constate une tendance marquée au développement de revêtements en couches minces, tout particulièrement en France [32, 39, 40]. Les bétons bitumineux minces et très minces se sont fortement développés en ville, où leur faible épaisseur et leur qualité acoustique constituent des atouts décisifs.

Nés en 1983, les bétons bitumineux très minces avaient été conçus essentiellement pour amener de l'adhérence, en particulier aux vitesses élevées. Leur développement s'est inscrit dans la logique de séparation des fonctions structurelles d'une part, superficielles de l'autre. Ces revêtements présentent une forte macrotecture, qui se traduit par une bonne adhérence à haute vitesse. La microtexture nécessaire pour l'adhérence à basse vitesse est, quant à elle, obtenue par la sélection des granulats. Les suivis réalisés sur de nombreuses sections ont montré que le niveau d'adhérence obtenu à haute et moyenne vitesse dépend essentiellement de la composition granulaire.

Des variantes des bétons bitumineux minces ouverts sont dotées de qualités acoustiques spécifiques, comme les bétons bitumineux minces discontinus. De construction relativement simple, ces solutions proposent une grande variété de couches bitumineuses pour une épaisseur maximale de 30 mm avec une porosité variant de "dense" (5-6% de vides) à "poreux" (25% de vide). Leur texture optimisée avec des agrégats de petite taille (entre 4 et 8 mm) offre de bonnes propriétés en termes de friction et d'excellentes performances acoustiques. La réduction du bruit est liée à la texture de surface qui est dotée d'aspérités suffisamment profondes et d'une faible granulométrie. En outre, l'intégration dans le liant d'élastomères ou de fibres de cellulose permet de conserver de bonnes propriétés mécaniques, en dépit de la minceur de la couche.

On distingue plusieurs sous-catégories en fonction de l'épaisseur :

- béton bitumineux mince (BBM) : 30 à 50 mm,
- béton bitumineux très mince (BBTM) : 20 à 25 mm,
- béton bitumineux ultra mince (BBUM) : 12 à 18 mm (cf. figure 2.24),
- microcouche de béton bitumineux : 6 à 12 mm.

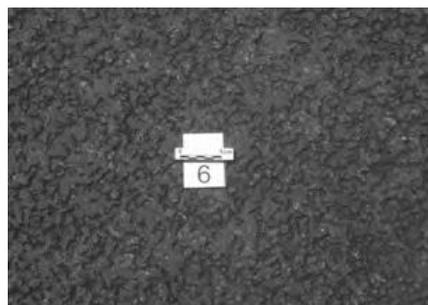


Figure 2.24 : Béton bitumineux ultra mince, [3].

Ce type de revêtement est également identifié en anglais par "*thinsurfacing*". La couche de 2 à 3 cm est caractérisée par un pourcentage assez élevé de granulats (autour de 70 %), posée à chaud et compactée au cylindre. On emploie le plus souvent des granulats de granulométrie réduite pour réaliser des bétons bitumineux mince (BBM) ou très mince (BBTM). A titre illustratif, il peut présenter une granulométrie de 0/10 et être dépourvu d'agrégats 2/7 d'où l'appellation "discontinu". L'absence d'une classe de granularité permet de diminuer l'épaisseur du revêtement et de favoriser la création d'interstices, améliorant ainsi la porosité du revêtement (qui reste toutefois moins drainant qu'un BBD_r) et donc ses performances en termes d'absorption acoustique. Du fait de l'utilisation de granulats de calibre plus petit, la texture de surface est optimisée pour faire moins de bruit²⁵. Le recours à des granulats de petite taille limite les phénomènes de vibrations et de chocs pneumatique / chaussée générateurs de bruit. Les qualités acoustiques des bétons bitumineux minces varient sensiblement en raison des différences entre les techniques de pose et les matériaux. Les réductions obtenues se situent typiquement entre 3 et 6 dB(A). Des gains supplémentaires peuvent être obtenus en cas d'utilisation de produits dans lesquels ont été rajoutés des polymères ou des matériaux poreux. La mise en œuvre de ce type de revêtement comporte certains avantages :

- les bétons bitumineux minces offrent une bonne résistance à la formation d'ornières,
- ils disposent de bonnes qualités antidérapantes en raison d'une bonne rugosité de surface,
- en fonction de leur porosité, ils permettent de réduire la quantité d'eau projetée, améliorant ainsi également la visibilité en cas de pluie.

Les bétons bitumineux minces présentent toutefois quelques inconvénients :

- ils sont moins résistants aux contraintes tangentielles qu'un revêtement classique : il est donc préférable de ne pas les utiliser aux carrefours, dans les ronds-points, les virages serrés ;
- le passage sur une chaussée existante classique à du revêtement en couche mince nécessite de réaliser une couche de liaison en plus de la couche de roulement.

La principale différence d'un BBUM avec un BBTM s'exprime par une notion de dosage moyen au m², plus significative qu'un critère d'épaisseur. Le BBUM est moins riche en sable que le BBTM. Du point de vue des performances acoustiques, les expérimentations associées au développement de procédés inédits de fabrication menés dans les années 1990 avaient montré des performances acoustiques comparables entre le BBUM et les BBTM²⁶.

²⁵ Ce type de revêtement réduit le niveau de bruit par rapport à un revêtement de référence (asphalte dense 0/16) entre 2 et 5 dB(A) ; d'environ de 3 à 5 dB (A) pour les véhicules légers et de 2 à 3 dB (A) pour les poids lourds (cf. §2.4.2).

²⁶ Procédé EURODUIT/NOVACHIP SCREG (source : USIRF).

BBTM classe 1 et classe 2 (IFSTTAR anciennement LCPC²⁷)

Le profil type de ces enrobés peut être décrit de la façon suivante. Ces enrobés peuvent être regroupés, pour la plupart, parmi les BBTM de classe 2 de la norme NF EN 13108-7. Cette classe 2 correspond à une teneur en vides élevée comprises entre 20 et 25% pour les BBTM 0/6 et entre 18 et 25% pour les BBTM 0/10.

Ces teneurs en vides sont beaucoup plus fortes que celles correspondant à la classe 1, utilisée de manière traditionnelle depuis l'apparition de ces BBTM qui remontent au début des années 80. Cette porosité est obtenue par des compositions granulaires intermédiaires entre celles des enrobés drainants et celles des BBTM de classe 1. Le dosage en sable (fraction 0/2) est compris entre 15 et 25% et plus généralement proche des 20%. La courbe granulométrique présente une discontinuité : coupure 4/6 pour les BBTM 0/6 et coupure 2/6 pour les BBTM 0/10. La proportion en granulats 4/6 ou 6/10 selon les calibres 6 ou 10 mm est forte (comprise entre 75 et 85%). L'une des clés de la réussite de ces techniques réside dans l'obtention de cette discontinuité bien marquée, nécessitant parfois pour les BBTM 0/6, une fabrication spéciale pour la fraction 4/6 ayant un passant à 4 mm voisin de 10% maximum (au lieu de 15% dans les fabrications traditionnelles).

Ces prescriptions sont semblables à celles imposées pour la fabrication des enrobés drainants 0/6. Le calibre le plus courant en milieu urbain pour réduire le bruit est le 6 mm. Les teneurs en fines sont assez élevées : 6 à 8%, de façon à rigidifier le mastic bitumineux qui enchâsse les granulats en forte quantité et à éviter tout risque d'écoulement du liant.

²⁷ Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.

2.2.5. Enrobés de dernière génération

Certains nouveaux produits sont très prometteurs. Ils utilisent des tailles de granulats extrêmement réduites, tels que les BBTM de classe 2, basés sur des formules granulaires discontinues, avec un calibre de granulats de 0/4 mm et présentent une absorption acoustique importante (> 20% de vides). La figure 2.25 illustre ce propos.

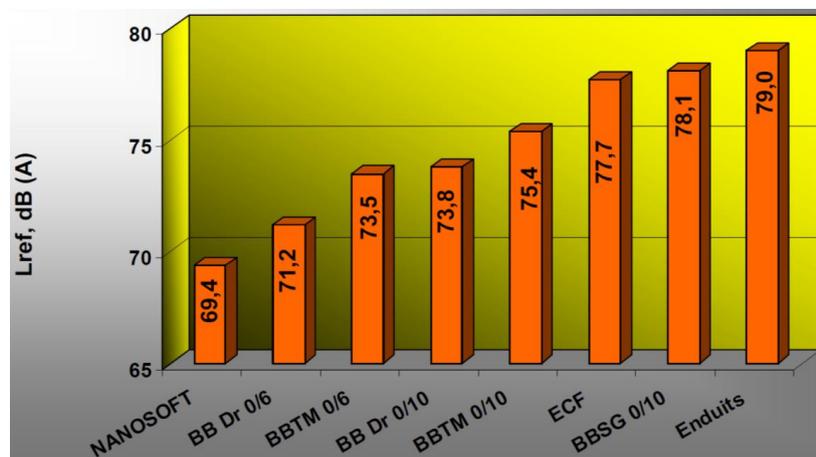


Figure 2.25 : Diagramme extrait de la base de données des LRPC (valeurs moyennes des mesures L_{max} réalisées en véhicules isolés (VI), à 90 km/h, par famille de revêtements) ; source : Notice technique NANOSOFT, COLAS (2010).

Ces solutions ont un effet immédiat sur l'ensemble de la circulation et peuvent remédier à un point noir particulier sans qu'il soit nécessaire d'agir sur l'ensemble des infrastructures d'une ville ou d'une région ni sur l'ensemble du parc automobile. Ces revêtements routiers dits silencieux peuvent également avoir un impact sur les performances énergétiques des véhicules, du fait de la faible taille de leurs granulats (éléments de structure interne). En effet, pour un véhicule donné, la résistance au roulement peut varier de 20 à 40% (Source : Michelin et Laboratoire Central des Ponts et Chaussées), en fonction de la rugosité du revêtement routier. À son tour, cette variation a un impact direct et non négligeable sur le volume de carburant consommé. Les enrobés présentant la macrostructure la plus fine permettent ainsi de réduire la consommation de carburant et les émissions de gaz d'échappement de 3 à 7% [51].

A l'heure actuelle, les concepteurs de revêtements de chaussées ne disposent pas de suffisamment de recul pour communiquer des données précises pour la nouvelle génération d'enrobés silencieux. Cette nouvelle génération de produits est trop jeune pour disposer d'un nombre conséquent d'études concernant les performances après plusieurs années d'exploitation sous différentes conditions (vitesses de circulation, intensité du trafic, pourcentage de PL, conditions météorologiques...). Pour autant, les formulations de ces nouveaux produits ayant été développées à partir de l'expérience acquise avec les matériaux de génération précédente comme les BBTM, la durabilité des enrobés silencieux de dernière génération n'est ainsi pas totalement inconnue.

2.2.6. Futurs revêtements de chaussée "silencieux"

Les futurs revêtements de chaussée sont encore en phase de développement, néanmoins leur potentiel de réduction du bruit dépasse l'ensemble des revêtements existants.

Pour les revêtements poroélastiques, le gain acoustique initial réalisé atteint en moyenne 7 à 12 dB(A) d'après les premières expériences réalisées au Japon et en Suède, ce qui les rapproche du domaine d'efficacité des écrans anti-bruit. Par définition, les revêtements poroélastiques combinent simultanément l'efficacité acoustique des revêtements "poreux" et "viscoélastiques". Concrètement, il s'agit de revêtements à porosité ouverte offrant une bonne capacité de drainage et intégrant des propriétés viscoélastiques à travers une forte proportion d'élastomères "élastiques" (donc pas de bitume) dans leur composition (cf. figure 2.26). Le revêtement poroélastique n'est pas à confondre avec l'asphalte à caoutchouc.

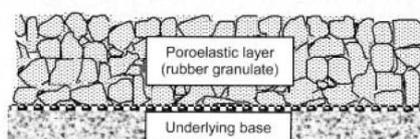


Figure 2.26 : Schéma de construction d'un revêtement poroélastique, [2].

La mise en mouvement élastique des éléments superficiels du revêtement, provoquée par la circulation, empêche les salissures de s'incruster dans les vides, ce qui est un atout majeur pour la durabilité des performances acoustiques. Jusqu'à présent, les formulations les plus généralement utilisées comprennent :

- 40 à 95% de caoutchouc (provenant notamment du recyclage de pneumatiques usagés) éventuellement mélangé à du sable ou à des granulats ;
- 5 à 15 % du poids de liant (polyurethane),
- un liant complémentaire destiné à coller le revêtement poroélastique sur son support,
- une teneur en vides de 25 à 40 % du volume.

Les formulations de revêtements poroélastiques développées à l'étranger semblent avoir repoussé suffisamment loin les problèmes signalés initialement comme la qualité antidérapante sur chaussée humide, l'adhérence au support, la résistance au feu ou encore les coûts élevés, pour que des tests pratiques en conditions réelles soient à présent réalisés. De plus amples informations sur le sujet sont disponibles sur le site internet www.persuadeproject.eu.

2.3. Mise en œuvre, maintenance et coût

Opter pour la mise en œuvre de revêtements de chaussée "silencieux" nécessite de mettre en place une politique de maintenance adaptée à la charge de trafic sur la voirie concernée et à la pérennité des performances du revêtement envisagé. Un revêtement de chaussée acoustique s'avère plus onéreux qu'une solution classique ; le plus souvent, il est plus coûteux à mettre en œuvre et à entretenir. Dans le même temps la durée de vie prévue d'un revêtement de chaussée silencieux est plus réduite. Les processus qui peuvent influencer sur la dégradation acoustique des revêtements de chaussées silencieux sont la perte de granulats par arrachement et la réduction de l'absorption pour les revêtements ouverts ou drainants.

Nous présentons dans ce chapitre, outre les aspects de surcoût par rapport à un revêtement de chaussée classique, les spécificités de mise en œuvre et de maintenance de deux types de revêtements de chaussée présentant des propriétés acoustiques intéressantes : les bétons bitumineux drainants (mono et bicouche) et les bétons bitumineux minces et très minces.

2.3.1. Mise en œuvre

La pose d'un revêtement de chaussée silencieux est un processus critique. Il faut être attentif aux spécificités du site (contexte), aux conditions météorologiques et aux compétences de l'équipe de pose du revêtement. Des résultats de mesure ont montré que, dans les premiers temps de pose du revêtement, l'adhérence par temps sec ou humide pouvait être faible. Il est recommandé d'en avertir les usagers. Les aspects suivants doivent être intégrés en amont dans l'évaluation ou le choix des revêtements de chaussées acoustiques :

- pour les revêtements ouverts ou drainants, il est nécessaire d'intégrer des accotements pour la récupération des eaux. Cela peut entraîner un surcoût pour le nettoyage et l'entretien périodique ;
- la présence de porosité peut diminuer la capacité portante de la route (spécialement si il y a présence importante de PL). Il faut parfois prévoir des travaux pour renforcer la capacité portante de la chaussée.

Rappelons que presque tous les revêtements de chaussée acoustiques ne sont pas suffisamment résistants aux pneumatiques dans des phases de contact en friction. Ils ne sont pas une application appropriée pour les croisements ou les carrefours giratoires.

2.3.1.1. Bétons bitumineux drainants (BBDr)

Ce type de revêtement de chaussée nécessite une mise en œuvre plus coûteuse que les revêtements de chaussées classiques. Il est nécessaire d'utiliser un mélange approprié de granulats - dont les dimensions ne peuvent excéder des limites fort étroites - pour obtenir la structure ouverte du BBDr. Une opinion erronée largement répandue prétend que le BBDr est moins solide que le béton bitumineux dense. Il ne suffit cependant pas d'utiliser des agrégats possédant les dimensions adéquates, le BBDr doit aussi être compacté par vibrations ou au rouleau après la pose. Il faut également prévoir une couche étanche sous la couche supérieure en BBDr, afin de protéger les couches inférieures de la route contre l'infiltration d'eau. On peut par exemple utiliser une feuille étanche ou une couche de béton bitumineux dense.

Afin de d'optimiser la texture de surface, lorsque l'enrobé bitumineux est encore chaud, il est relativement aisé de déplacer les granulats. Si l'on passe un rouleau sur la surface chaude, les

granulats se positionnent à la surface avec la face la plus lisse vers le haut, ce qui donne une surface plane ne présentant pas de grandes irrégularités. De la même manière, la mise à plat des granulats au compactage sur les revêtements très minces diminue ces effets.

Précisons néanmoins que, dans les courbes, les intersections, les entrées /sorties pour les camions, les places de stationnement, ce type de solution a tendance à se dégrader (arrachement des granulats). De ce fait, l'utilisation du BBDr en général est à éviter sur les ronds-points et sur les croisements de route. Dans les rues à faibles vitesses, l'effet autonettoyant ne joue presque pas, entraînant à un colmatage rapide et une dégradation inéluctable des performances acoustiques. Dans la littérature on ne peut pas trouver des preuves qu'un programme de nettoyage peut éviter cet effet. Le BBDr est donc à déconseiller pour les routes à faible vitesses (< 70 km/h).

2.3.1.2. Bétons bitumineux minces (BBM), très minces (BBTM) et ultra minces (BBUM)

Cette technique est parfois utilisée pour réparer un revêtement de chaussée usé, à certains endroits ou sur toute la surface. Cette approche s'avère bon marché et peut être mise en œuvre sur des routes où l'intensité du trafic n'est pas trop importante. Le surcoût associé à leur mise en œuvre est d'environ 10% par rapport à un revêtement usuel en béton bitumineux dense. Pour les BBTM, une bonne longévité des revêtements mis en œuvre à froid est parfois rapportée, même là où la circulation est intense [41].

L'application des BBTM s'effectue à l'aide d'un finisseur traditionnel, généralement réglé en mode "vis calées", et précédé par une répandeuse réalisant la couche d'accrochage à raison de 300 à 400 g/m² de bitume résiduel.

En revanche, celle des BBUM fait le plus souvent usage, soit d'un matériel spécifique, soit d'un finisseur équipé d'une rampe intégrée et de son dispositif de stockage et de dosage associé, mais certaines formulations ou procédés emploient un matériel tout à fait classique. Dans ce dernier cas, on a recours à des liants de couche d'accrochage particuliers (limitant le collage aux pneumatiques) ou à la réalisation sur celui-ci d'un gravillonnage clairsemé ; le finisseur utilisé peut alors présenter certaines adaptations (table légère, sans tampeur, vérin d'allègement de table...).

Le compactage des BBTM et même des BBUM (si l'on peut encore parler de compactage eu égard à l'épaisseur réduite de la couche) s'effectue le plus souvent pas des cylindres lisses. Disposant d'une largeur de bille importante, sans vibration, excepté pour la fermeture des joints. En général, 4 à 8 passes suffisent pour obtenir une bonne cohésion et densification. Ce compactage doit intervenir très rapidement derrière l'enrobé.

L'ouverture à la circulation est possible dès que le revêtement a refroidi (les épaisseurs étant très minces, le délai de remise en service est assez court, généralement moins d'une heure).

2.3.2. Maintenance

En raison de la durabilité réduite des produits acoustiques, le risque d'une dégradation sur le long terme est moins important que pour un produit classique que l'on aura tendance à laisser plus longtemps. En effet, afin de maintenir de bonnes performances acoustiques, il vaut mieux intégrer le principe de changer régulièrement. Il est vivement recommandé aux gestionnaires d'infrastructures de mettre en place, lors de la réception des produits, des mesures en vue de s'assurer que la performance acoustique des revêtements est conforme à la performance affichée par le constructeur.

Dans ce sens, une stratégie d'entretien est souhaitable, en particulier pour les revêtements peu bruyants en couches minces. Pour optimiser la gestion de la performance des revêtements de chaussées, il est conseillé de mettre en œuvre un programme de surveillance des performances acoustiques durant la vie du produit. Des mesurages périodiques des caractéristiques acoustiques

des revêtements peuvent être réalisés tous les 5 ans par exemple pour un revêtement dense, tous les 2 ans pour un revêtement ouvert ou drainant.

Dans le cadre d'une politique de réduction du bruit routier, cette approche permet aux gestionnaires et décideurs de disposer d'un suivi synoptique des effets acoustiques (cf. figures 2.27 et 2.28). Il est recommandé de comparer les résultats avec les performances d'un revêtement classique. Ainsi, un tel programme de surveillance permet de mieux comprendre les évolutions sur le long terme des revêtements de chaussées silencieux. Ces connaissances entérinent le bien-fondé des choix à effectuer en termes de solutions durables aux problèmes du bruit routier.

En Suisse, il est préconisé que le renouvellement périodique des revêtements peu bruyants en couches minces, s'effectue en fonction des résultats du suivi acoustique [42]. Il est possible d'obtenir ainsi une réduction du bruit à long terme.

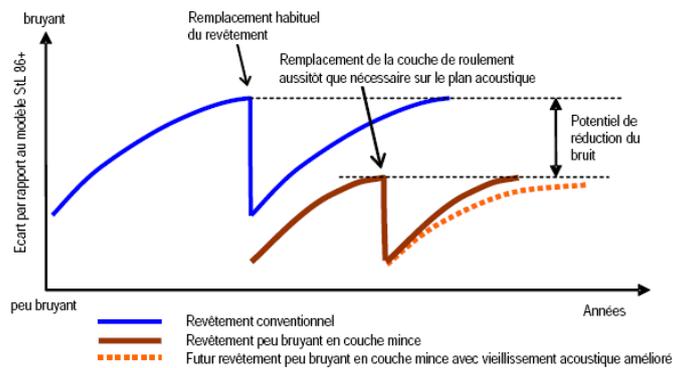


Figure 2.27 : Maîtrise long terme des performances acoustique d'un revêtement de chaussée, [2].

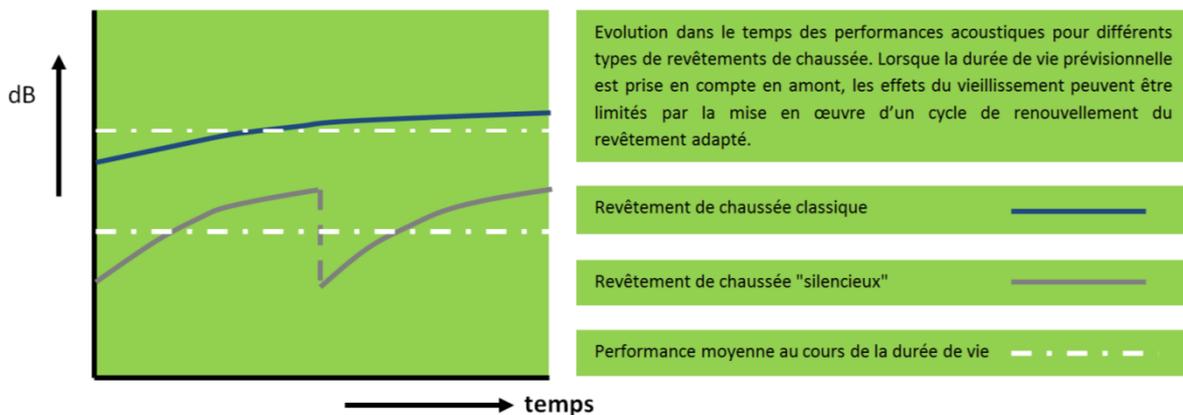


Figure 2.28 : Maîtrise long terme des performances acoustique d'un revêtement de chaussée, (source : Working Group Noise EUROCIETIES).

2.3.2.1. Bétons bitumineux drainants (BBDr)

En milieu urbain, la vitesse de circulation est moins importante, ce qui réduit la capacité d'autonettoyage des revêtements ouverts ou drainants. Ainsi à faible vitesse, un colmatage rapide et une dégradation des performances acoustiques sont inéluctables. Pour contrer le risque de colmatage, la mise en œuvre de programmes de maintenance, basés sur un nettoyage périodique (une fois à deux fois par an) au moyen de machines spéciales, n'a à ce jour pas démontré son efficacité.

Sans l'effet autonettoyant, la performance de réduction du bruit disparaît rapidement, la durabilité du produit devient basse, spécialement en contexte urbain où les dommages (arrachement et colmatage) sont plus fréquents. Il y a également plus de mouvements de torsion et de friction du pneumatique liés aux conditions spécifiques de circulation. En contexte extra urbain, la durabilité du produit est plus importante.

Le BBDr est donc à déconseiller pour les routes à faible vitesses (< 70 km/h).

En résumé, en termes de maintenance, ce type de solution présente quelques inconvénients principalement liés à son vieillissement (réduction de la durée de vie en raison du vieillissement plus rapide du liant) :

- les vides ont tendance à se boucher, particulièrement sur les routes urbaines où les vitesses de 50-60 km/h ne permettent pas un autonettoyage des vides, ce qui a pour conséquence d'augmenter le niveau de bruit;
- le processus d'autonettoyage du BBDr bicouche n'est effectif qu'à partir d'une vitesse supérieure à 70 km/h, l'utilisation de ce type de revêtement dans le domaine des faibles vitesses contraint à deux nettoyages annuels à l'aide de machines spéciales, pour contrer le risque de colmatage (l'efficacité du nettoyage haute pression n'a pour l'instant pas suffisamment fait ses preuves) ;
- l'entretien en période hivernale s'avère plus difficile (salage plus fréquents et en grande quantité) ;
- réparations usuelles de la chaussée plus complexes.

2.3.2.2. Bétons bitumineux minces (BBM) et très minces(BBTM)

La quantité restreinte de matériaux nécessaire à leur construction rend ces revêtements plus faciles à renouveler lorsque la limite de la durée de vie acoustique est atteinte. L'entretien d'hiver est comparable à ce qui se fait normalement sur les surfaces poreuses.

2.3.2.3. Réparations

Un revêtement en béton bitumineux présente l'avantage de pouvoir être réparé sans qu'il soit nécessaire de remplacer la totalité du revêtement. Sur le plan acoustique, il est cependant capital d'effectuer ces réparations dans les règles de l'art. Si la réparation est peu soignée, le revêtement présente des saillies ou des creux (figure 2.29), ce qui accentue la mégatexture du revêtement et, par conséquent, le niveau de bruit généré.

Dans la pratique, deux méthodes de réparation sont envisageables pour le béton bitumineux: le procédé "à froid", destiné aux réparations provisoires, et le procédé "à chaud", garant de réparations durables. Une réparation durable, effectuée dans les règles de l'art, comporte huit étapes (cf. tableau 2.3). La figure 2.33 présente le résultat obtenu, un an après la réparation.



Figure 2.29 : Etape n°1, [3].

Etape	Opération
N°1	Délimiter le lieu de réparation
N°2	Inciser à la verticale et enlever le revêtement (cf. figure 2.30)
N°3	Nettoyer et sécher (cf. figure 2.31)
N°4	Poser un agent collant
N°5	Poser une garniture d'étanchéité préformée (cf. figure 2.32)
N°6	Comblers le creux à l'aide de béton bitumineux coulé à chaud
N°7	Compacter le mortier de remplissage
N°8	Epandage superficiel

Tableau 2.3 : Etapes de réparation durable d'un revêtement de chaussée en béton bitumineux, [3].



Figure 2.30 : Etape n°2, [3].



Figure 2.31 : Etape n°3, [3].



Figure 2.32 : Etape n°5, [3].



Figure 2.33 : un an après la réparation, [3].

2.3.3. Coût d'un revêtement de chaussée "silencieux"

Le rapport coût / efficacité d'un revêtement de chaussée "silencieux" ne peut être apprécié qu'en comparant son coût à ceux des solutions de réduction du bruit classiques (écrans anti-bruit ou isolation de façade). Bien que les revêtements de chaussée silencieux soient une solution avec un surcoût à intégrer par rapport aux revêtements de chaussées classiques, ils demeurent la plupart du temps la mesure de réduction de bruit la moins onéreuse et la plus efficace pour un nombre important de riverains d'infrastructures routières. Pour évaluer correctement le coût d'un revêtement acoustique, il faut tenir compte de trois facteurs :

- les coûts inhérents à la pose qui dépendent du type de revêtement, de l'épaisseur de la couche supérieure et de l'assise. La pose de revêtements acoustiques présente au final un surcoût qui peut aller de 20 % environ (cas du SMA et de certains enduits de résine synthétique) à beaucoup plus dans le cas de BBDr bi-couches ;
- les coûts liés à la maintenance (main d'œuvre et machines spéciales pour le nettoyage périodique du BBDr par exemple) ;
- les coûts liés au grand entretien (remplacement de la couche supérieure d'un revêtement par exemple).

Le facteur coût doit être appréhendé de manière différente selon s'il s'agit d'une nouvelle construction de route (surcoût à mettre en relation avec le gain de confort et de qualité de vie des futurs riverains de l'infrastructure) ou s'il s'agit d'un changement de revêtement en vue de résoudre le problème du bruit généré par le trafic sur une voirie existante (le surcoût doit alors être comparé aux coûts des autres mesures potentielles comme la construction d'écrans, l'isolation acoustique des bâtiments...). Une analyse coût-bénéfice s'avère alors nécessaire pour chaque contexte.

Une étude danoise [11, 12] fournit des exemples de calculs comparatifs des coûts intégrés sur 30 ans des différentes mesures de lutte contre le bruit pour différents types de voiries. Le tableau 2.4 synthétise les principaux résultats.

		Rue en centre-ville	Bd urbain ou périphérique	Autoroute
Caractéristiques de la voirie (pour 1 km)	Vitesse (km/h)	50	70	110
	Nombre de voies	2 x 1	2 x 2	2 x 3
	Distance entre les fronts bâtis de part et d'autre de la rue (m)	15	32	30
	Nombre de véh/jour	12 000	30 000	60 000
	% de véhicules lourds	10	10	10
	Niveau de bruit au 1 ^{er} étage en dB(A)	68	73	77
	Type d'habitations	Blocs d'appartements accolés, 6 étages, avec des magasins au rdc	Blocs d'appartements accolés, 3 étages	Maisons individuelles
	Nombre d'habitations	665	399	435
Mise en place d'un revêtement type BBDr	Coût sur 30 ans en €	296 000	360 000	477 000
	Réduction de bruit en dB(A)	5	6	7
	Coût en €/dB(A)/habitation	89	150	157
Pose d'écran anti-bruit	Coût sur 30 ans en €	<i>Mesure non pertinente (espace insuffisant)</i>	1 335 000	1 590 000
	Réduction de bruit en dB(A)		0-12 (moyenne : 3,9)	4-13 (moyenne : 8,5)
	Coût en €/dB(A)/habitation		851	430
Isolation acoustique des logements	Coût sur 30 ans en €	2 685 000	1 607 000	578 000
	Réduction de bruit en dB(A)	9*	9*	9*
	Coût en €/dB(A)/habitation	449	448	148

Tableau 2.4 : Calcul comparatif des coûts intégrés sur 30 ans des différentes mesures de lutte contre le bruit pour différents types de voiries ; étude danoise [11, 12] (*²⁸).

Dans ces exemples, le prix total ainsi que le rapport coût / efficacité (coût par dB(A) / habitation) sont nettement favorables à la pose d'un revêtement acoustique.

²⁸ * Gain à relativiser dans la mesure où celui-ci n'est valide que pour une situation fenêtre fermée.

2.4. Performances acoustiques

Les gains mesurés sur le plan acoustique d'un changement de revêtement de type bitumineux "classique" par un revêtement acoustique sont de l'ordre de 3 à 6 dB(A) et peuvent aller jusqu'à 9 dB(A) selon les performances acoustiques du revêtement sélectionné, son âge et les conditions de circulation (fluide ou saccadée, vitesse, taux de poids lourds...). Il est également intéressant d'exploiter les outils de modélisation afin d'appréhender les ordres de grandeur des performances acoustiques des revêtements de chaussées en fonction des différents paramètres d'influence.

Dans ce sens, ce chapitre présente brièvement les deux méthodes de mesure des performances acoustique des revêtements de chaussées (cf. §2.4.1). La mise en œuvre de ces méthodes permet de comparer les différents produits disponibles sur le marché pour une vitesse de référence (cf. §2.4.2). Les §2.4.3 et §2.4.4 présentent respectivement la modélisation du bruit de roulement proposée en France [5] et les performances acoustiques des revêtements de chaussée en fonction de la vitesse de circulation du véhicule.

En complément de ces procédures de mesure des performances acoustiques, d'autres caractéristiques physiques du revêtement de chaussée, telles que le profil de texture, l'absorption acoustique, la perméabilité ou les capacités d'écoulement de l'eau, sont généralement également mesurées. Nous n'aborderons pas en détail les méthodes de mesure des caractéristiques non acoustiques. Toutefois, précisons que ces éléments sont largement documentés au sein des références suivantes : [1, 2].

2.4.1. Méthodes d'évaluation

Il existe deux types de procédures de mesure des performances acoustiques des revêtements de chaussée : les procédures de mesure "au passage" (normes NF EN ISO 11819-1 et NF S 31-119-2) et les procédures de mesure en champ proche ou en continu (normes XP S 31 145 et ISO 11819 - 2). Les deux méthodes de mesures se complètent. La méthode "au passage" fournit des valeurs précises pour une section de chaussée discrète et constitue la base de la comparaison avec le modèle d'émission théorique, tandis que la méthode en "champ proche" permet de relever des valeurs acoustiques caractéristiques du revêtement sur toute la longueur d'un tronçon et d'évaluer son homogénéité. En outre, la méthode de mesure en champ proche permet également de récolter simultanément aux mesures acoustiques des données auxiliaires liées à la texture de la surface du revêtement.

2.4.1.1. Procédure de mesure "au passage"

Cette procédure consiste à mesurer les niveaux sonores au passage de véhicules à 7,50 m du bord de l'infrastructure routière (plus précisément à 7,50 m de l'axe de la bande de roulement à caractériser) et à 1,20 m de hauteur (cf. Figure 2.34). Méthode de mesure privilégiée en France pour caractériser le bruit de contact pneus chaussée, elle consiste à mesurer le bruit produit :

- soit par le passage d'un échantillon de véhicules du trafic (procédure VI : véhicule isolé du flot de trafic),
- soit par des véhicules d'essai pris isolément hors trafic (procédure VM : véhicule maîtrisé²⁹).

Pour les véhicules légers, les deux méthodes "VI" et "VM" fournissent, des résultats proches à ± 1 dB(A).

²⁹ Le terme "maîtrisé" signifie que les véhicules d'essai ne sont pas quelconques et qu'ils sont conduits dans des conditions bien définies. Cette méthode nécessite de réaliser les mesures en l'absence du trafic automobile.

Les conditions opératoires à respecter sont strictes et contraignantes (tracé linéaire, sans pente, sans obstacle direct, revêtement sec,...). Ces deux approches sont explicitées dans la norme NF S 31-119-2.

Au niveau international, et dans le cadre des études réalisées à l'échelle Européenne, la procédure au passage privilégiée (utilisée) est la méthode "statistique au passage" (statistical pass-by method SPB). Cette méthode est décrite dans la norme internationale ISO 11819 - 1³⁰ (cf. figure 2.35).

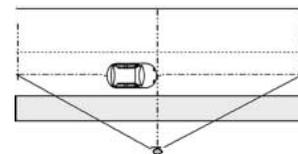


Figure 2.34 : Procédure de mesure "au passage".

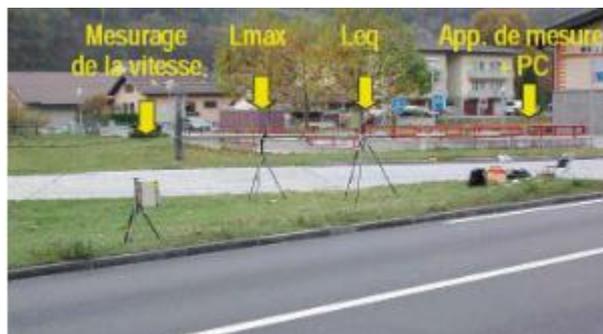


Figure 2.35 : Méthode statistique au passage (ISO 11819 - 1), [2].

Concernant la procédure VI, des couples "logarithme de la vitesse" / "bruit" sont enregistrés et une corrélation est établie pour déterminer le bruit pour une vitesse de référence donnée et une catégorie de véhicules. La norme spécifie 4 classes de véhicules, mais dans la pratique on ne mesure que les véhicules légers (VL), et les trains routiers ayant 4 ou 5 essieux (TR) (les autres classes étant trop peu représentées).

Cette méthode permet, d'une part, de quantifier pour les conditions de trafic existantes, l'effet du revêtement sur le bruit du trafic et d'autre part, si les conditions sont identiques, de comparer les performances acoustiques des revêtements routiers pour chaque classe de véhicule.

Cette méthode nécessite la mesure du bruit au passage d'au moins 80 véhicules par classe. Le niveau de pointe L_{Amax} en dB(A) de chaque classe de véhicule est ensuite ramené à une température de référence de 20°C. Une correction de température est appliquée (-0,1 dB(A) par degré Celsius). Les mesures sont stockées dans une base de données pour une vitesse de référence de 90 km/h et une température de 20°C.

2.4.1.2. Procédure de mesure "en champ proche"

Ces procédures consistent à mesurer sur des véhicules en roulement le bruit émis par un ou plusieurs pneumatiques d'essai en champ proche de la roue (moins de 1 m). Ces procédures peuvent, dans la plupart des cas, être mises en œuvre sous circulation. Les mesures sont échantillonnées de façon continue sur la section de route à caractériser et permettent d'apprécier l'homogénéité d'un itinéraire. Elles nécessitent l'utilisation d'un matériel spécifique afin d'assurer la fiabilité des résultats.

En France, la procédure est décrite dans la méthode d'essai n°63 "Mesure en continu du bruit de contact pneumatique d'essai" du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), en fonction du type d'application recherchée. Les procédures de mesure en continu font l'objet d'une norme partiellement publiée (XP S 31 145-1, partie 2 non disponible à ce jour).

³⁰ Proche de la méthode française (VI) - 3 classes de véhicules (VL, PL à 2 essieux et PL à plus de 2 essieux) - nombre minimal de véhicules (100 VL et 30 pour chaque catégorie PL) - L_{Amax} et L_{Aeq} pour chaque passage - distance microphone / axe de la voie : 7,5 m pour L_{Amax} et 5 m pour L_{Aeq} - vitesse de passage de chaque véhicule mesurée à l'aide d'un radar - aucune correction de température.

A l'étranger, la procédure CPX ("Close-proximity method") décrite dans la norme ISO 11819 - 2 (cf. figure 2.36) est majoritairement mise en œuvre. Les principales exigences sur la section de route à caractériser sont les suivantes :

- mesure du bruit en simultanée par deux microphones,
- roue d'essai (roues du véhicule ou roue montée sur la remorque),
- vitesse stabilisée,
- niveau sonore et vitesse sont échantillonnés de façon continue,
- plusieurs passages peuvent être effectués,
- niveau sonore de l'échantillon recalé en fonction de la vitesse et pour une vitesse de référence donnée,
- calcul du niveau sonore moyen de la section de route considérée et de la dispersion autour de cette moyenne.

Le résultat d'une mesure est la moyenne des niveaux sonores enregistrés par les deux microphones³¹.

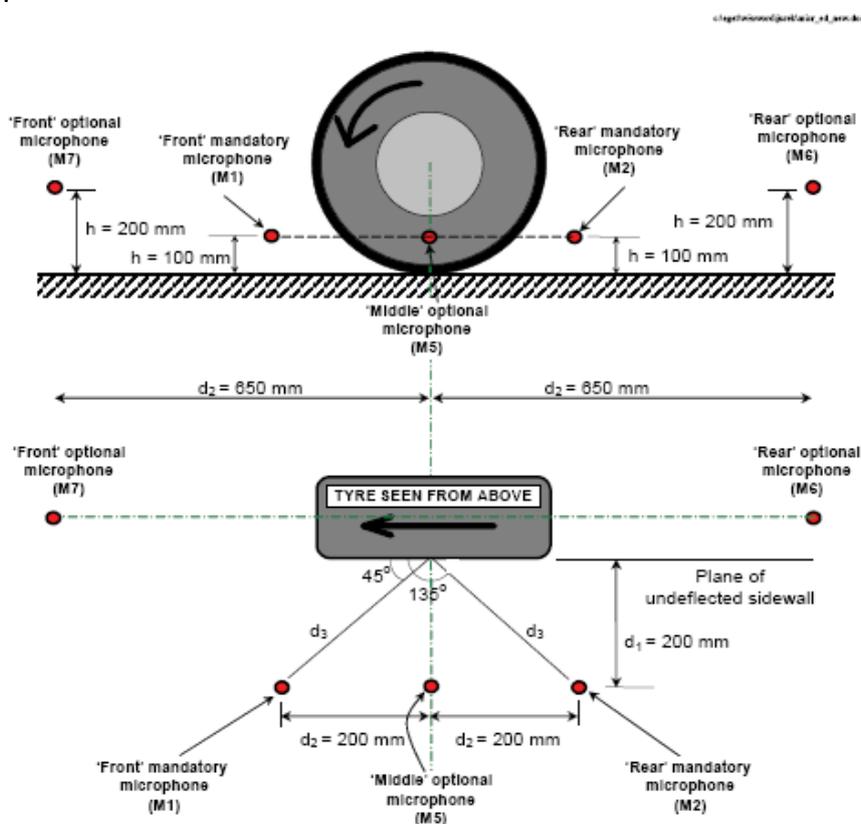


Figure 2.36 : Procédure CPX, [2].

Les microphones peuvent être placés dans des véhicules ou remorques dits "ouverts" (sans isolation acoustique autour du microphone), ou placés dans des chambres insonorisées à l'intérieur d'une remorque de mesure, comme l'illustre la figure 2.37.

³¹ Le matériel de mesure doit respecter un ensemble d'exigences destinées à s'assurer que le résultat ne soit pas affecté par des réflexions parasites ou des sources sonores autres que le pneumatique d'essai. Ces spécifications peuvent être complétées, le cas échéant, par une procédure d'analyse permettant, lors du dépouillement, d'écarter les échantillons perturbés (passage d'un autre véhicule, singularité sur la chaussée, etc.).



Figure 2.37 : Remorque de mesure CPX, [2].

2.4.1.3. Equivalence des méthodes "au passage" et "en champ proche"

Dans le cadre de l'étude "Revêtements peu bruyants à l'intérieur des localités" menée par l'OFEV et l'OFROU depuis 2003 en Suisse [2], les résultats des mesures selon la méthode "CPX" de nombreux sites ont été corrélés avec les mesurages selon la méthode "SPB" effectués à la même période. Une analyse des corrélations permet de vérifier que la distinction entre les produits est équivalente pour les deux méthodes en termes de performances acoustiques. Autrement dit, les produits les moins performants et les plus performants sont bien distingués de la même façon par les deux approches. Cette analyse peut être réalisée en convertissant les valeurs issues de la méthode "CPX" à l'aide du modèle en "écart par rapport au modèle StL- 86+³²". Les résultats de cette corrélation sont représentés dans la figure 2.38.

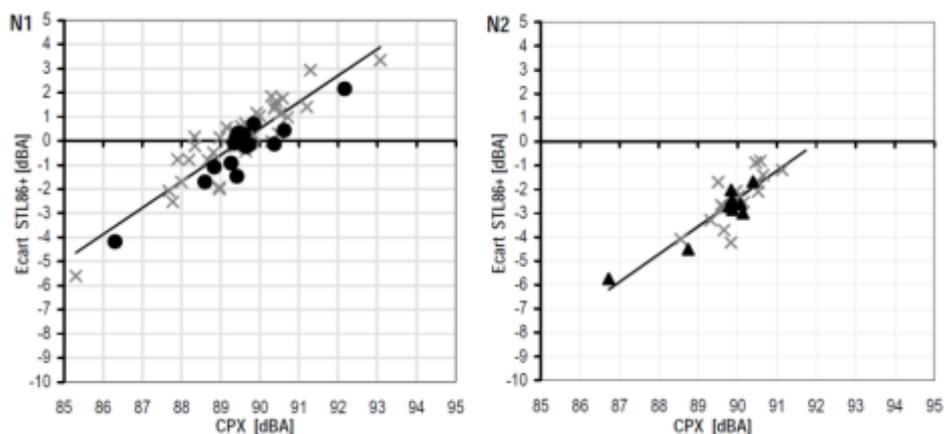


Figure 2.38 : Corrélation entre valeurs mesurées CPX et SPB à l'intérieur des localités ; vitesse limitée à 50 km/h ; à gauche VL ; à droite PL ; [2].

Les coefficients de détermination (R^2) pour les modèles de conversion employés varient respectivement entre 73% et 80% pour les PL et les VL.

³² L'évaluation des valeurs Leq , relevées en complément de la norme ISO, repose sur la procédure standard de calcul du bruit StL-86+, laquelle se fonde sur le Leq (corrections au modèle de calcul du trafic routier).

Les deux méthodes de mesurage "SPB" et "CPX" se complètent idéalement et, combinées, elles permettent une évaluation précise et globale des qualités acoustiques d'un revêtement de chaussée.

La méthode statistique au passage "SPB" détermine l'effet acoustique d'un revêtement de chaussée à une certaine section de chaussée par rapport au flot de trafic effectif. L'évaluation acoustique repose sur l'analyse statistique des émissions sonores normalisées par rapport à la vitesse de passage de tous les véhicules isolés. Pour pouvoir déterminer de façon représentative l'effet acoustique pour un trafic mixte, l'ensemble des exigences des sites de mesurage "SPB" doit être satisfaite, et un grand nombre de passages de VL et de PL doit être enregistré.

Les mesurages "CPX" permettent d'évaluer les propriétés acoustiques d'un revêtement sur l'ensemble du tronçon. Le mesurage en champ proche, continu et direct, du bruit de contact pneumatique-chaussée dans des conditions standard permet d'obtenir des informations sur l'homogénéité des performances acoustiques d'un revêtement. Les contraintes de site (réflexions, pentes, habitude de conduite, spécificités locales, composition du trafic, etc.) et les changements indésirables dans le temps (composition du trafic, pneumatiques, type de conduite), qui se produisent fréquemment lors des mesurages au passage, n'ont aucune influence. Par conséquent, la répétabilité et la comparabilité sont généralement plus élevées avec la méthode "CPX" qu'avec la méthode "SPB".

Toutefois, précisons que les différents types de matériel de mesure associés à la mise en œuvre de la méthode de mesurage "CPX" (remorque, véhicule, système ouvert ou insonorisé...) introduisent des différences systématiques. Ces différences sont facilement déterminées et ne nuisent pas, de ce fait, aux performances de la méthode "CPX" en termes de comparabilité des résultats de mesure³³.

2.4.2. Niveaux de bruit mesurés

En France, la méthode au passage est privilégiée et les caractéristiques acoustiques des revêtements sont rapportées à des conditions de température et de vitesse précises (20 °C et 90 km/h). Les diverses procédures de mesurage "au passage" permettent de hiérarchiser les revêtements de chaussées en fonction des niveaux de bruit mesurés. Le laboratoire Régional des Ponts et Chaussées (LRPC) de Strasbourg gère, pour le compte du SETRA, du CERTU et du réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées, une base de données répertoriant les mesures effectuées par les différents laboratoires régionaux selon les procédures VI et VM. Cette base de données est régulièrement mise à jour par Le LRPC de Strasbourg. Nous présentons ci-après les données du SETRA pour les méthodes de mesures "au passage" et "en champ proche".

2.4.2.1. Base de données "Mesures au passage"

Les figures 2.39 et 2.40 synthétisent les résultats des mesures effectuées entre 1995 et 2009. Les performances obtenues par des revêtements d'âges différents, regroupés en grandes familles, en termes de LA_{max} selon la méthode VI, à 90 km/h pour les véhicules légers (VL) et à 80 km/h pour les poids lourds à plus de trois essieux (trains routiers TR).

On constate des différences très significatives selon le type de revêtement acoustique utilisé avec des gains pouvant aller jusqu'à 9-10 dB(A) pour les VL par rapport à des bétons bitumineux ou des bétons de ciment classiques (sans propriétés acoustiques particulières) et jusqu'à 6-7 dB(A) pour les poids lourds (TR).

³³ Ce qui est important, in fine, c'est la comparabilité, d'un laboratoire de mesure à un autre, des différences de performances acoustiques entre deux revêtements de chaussée.

On remarque que l'ordre de classement des revêtements est à peu près identique pour les deux types de véhicules avec un décalage de 6 à 10 dB(A). Les revêtements les plus performants (pour des mesures au jeune âge : généralement entre 1 et 2 ans de service) sont de type drainant ou à porosité forte (cas des BBTM de classe 2 au sens de la norme en France). Ils correspondent à ceux dont le calibre du granulat (D) est faible (0/6)³⁴, ainsi que ceux dont la porosité contribue à une absorption de l'énergie sonore³⁵. Ceci montre bien l'influence des deux facteurs essentiels qui agissent sur la réduction du bruit de roulement : la taille des granulats et la porosité de l'enrobé.

La grande dispersion des résultats au sein d'une même technique de revêtements (de l'ordre de 5 à 6 dB(A) pour les techniques suffisamment renseignées) met en évidence les difficultés rencontrées pour prévoir de façon fine en laboratoire les performances acoustiques qui seront obtenues dans la réalité.

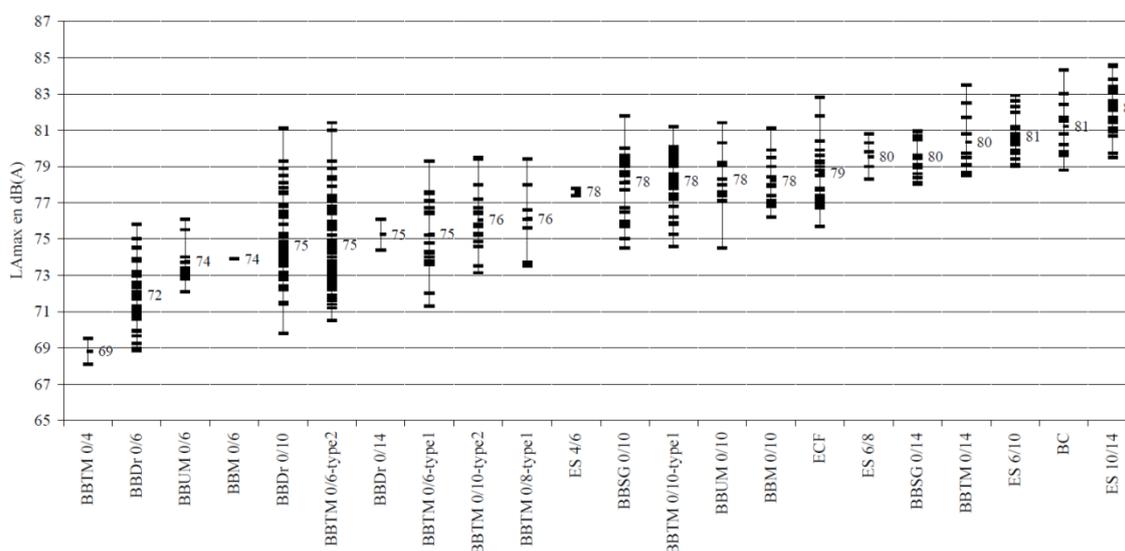


Figure 2.39 : Performances des revêtements de chaussées (LAmix, 20°C, 90 km/h) ; méthode "Véhicule Isolé / Véhicule Léger" ; base de données des revêtements de 403 mesures, [4].

³⁴ On constate que pour une même famille de produit, l'influence du calibre du granulat (D) de l'enrobé est bien déterminante, ainsi plus le D est petit, plus le bruit généré est faible.

³⁵ Plus le revêtement est poreux (différence entre la classe 1 et 2 des BBTM), meilleure est l'absorption et plus le bruit est réduit.

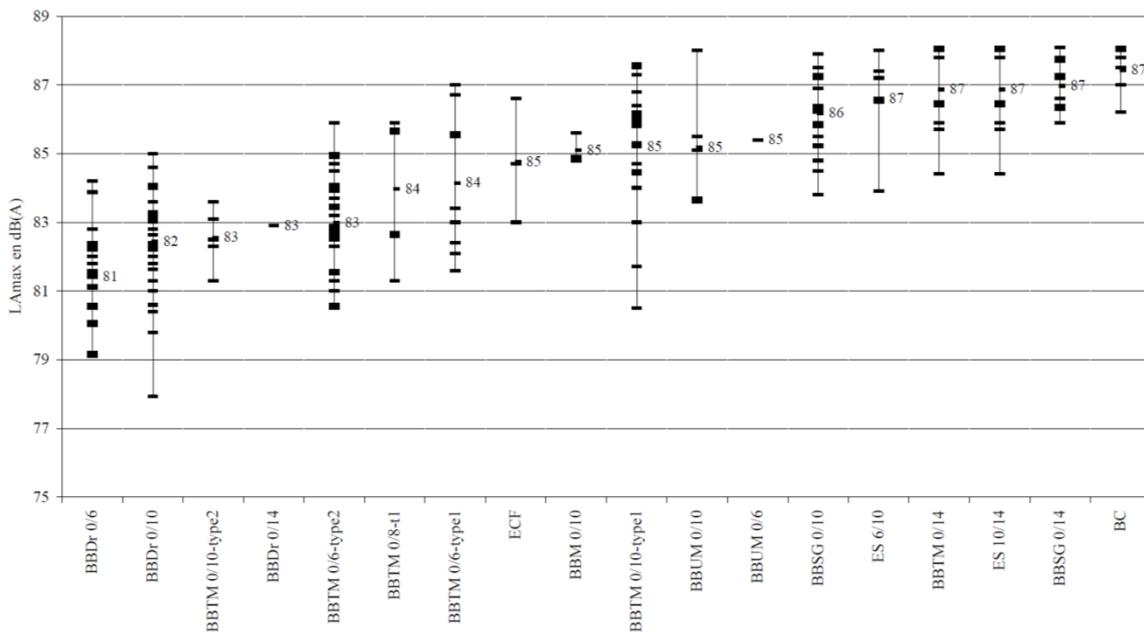


Figure 2.40 : Performances des revêtements de chaussées (L_{Amax}, 20°C, 80 km/h) ; méthode "Véhicule Isolé / Trains Routiers" ; base de données des revêtements de 201 mesures, [4].

2.4.2.2. Base de données "Mesures en continu"

Cette base répertorie les résultats des mesures de bruit de roulement en continu. Cette méthode étant normalisée depuis peu, le nombre de mesures est relativement faible (27 mesures à 90km/h). La figure 2.42 présente les mesures de niveau sonore de proximité en continu obtenues selon cette méthode, à 90km/h avec le même type de véhicule (cf. figure 2.41).



Figure 2.41 : Mesure du bruit de roulement en continu, [4].

Base de données des revêtements : 27 mesures CPX au 31/12/2009 (L_{pc}, température de 20°, vitesse 90 km/h)

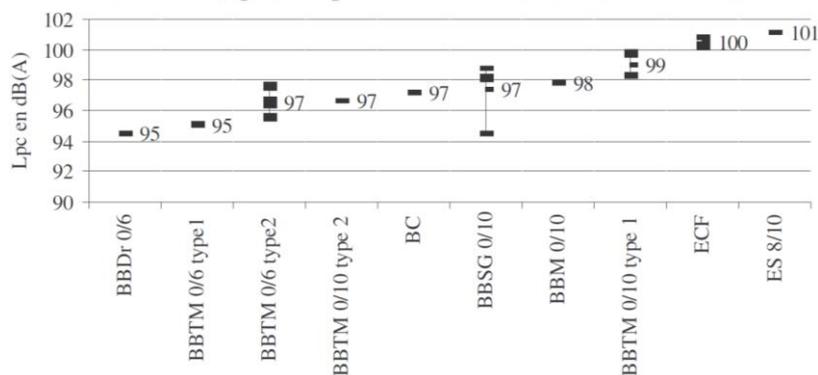


Figure 2.42 : Base de données - mesures en continu à 90 km/h, [4].

La base contient encore peu de mesures, mais on observe que la hiérarchisation des revêtements est globalement respectée, par rapport à la méthode de mesure au passage.

2.4.2.3. Influence du type de revêtement sur le niveau de bruit mesuré

Le tableau 2.5 issu des travaux du programme de recherche IPG [8] synthétise l'influence spécifique des différents types de revêtements de chaussée sur le bruit de contact pneumatique / chaussée.

Mécanisme	Type de revêtement de chaussée			
	SMA 0/6	BDR monocoûche	BDR bicouche	BBM / BBTM
Vibrations	↑	↓	↑	↑
Turbulence (bruit aérodynamique)	o	o	o	o
Air-pumping	?	↑	↑	↑
Effet dièdre	↑	↑	↑	↑?
Absorption du bruit de contact pneumatique / chaussée	↓	↑	↑	↑?
Absorption du bruit "moteur"	↓	?	?	?
Mec. impédance ³⁶	?	↑?	↑?	↑?

Tableau 2.5 : Influence des différents types de revêtements de chaussée sur le bruit de contact pneumatique / chaussée ; influence positive (↑), négative (↓), indifférent (o), ou inconnue, [8].

2.4.3. Modèles de prédiction

Différents modèles de prédiction du bruit routier existent. Nous limiterons notre présentation aux aspects concernant la modélisation des émissions sonores des composantes "bruit de roulement" et du "bruit moteur" issue du Guide de "Prévision du bruit routier" du Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements (SETRA) publié en juin 2009. Nous exploitons la partie 1 du document : "Calcul des émissions sonores dues au trafic routier" [5]; la partie 2 étant consacrée aux aspects de propagation du bruit (NMPB 2008³⁷). La partie 1 constitue le nouveau guide de prévision de l'émission du bruit émis par le trafic routier, usuellement appelé "**nouveau guide d'émission du bruit 2008**". Le précédent guide datait de 1980, le parc automobile, les revêtements routiers et les méthodes d'évaluation ont évolué, ce nouveau guide en propose une actualisation.

Il est intéressant d'exploiter cette méthode afin d'appréhender les ordres de grandeur des performances acoustiques des revêtements de chaussées en fonction des paramètres d'influence (type de véhicule, vitesse, allure, déclivité...), en particulier le gain en termes d'émissions sonores apporté par un revêtement "silencieux" par rapport à un revêtement classique. Ce gain est appelé "effet revêtement".

³⁶ L'impédance mécanique de la surface caractérise sa réponse à un impact. Cette propriété a été peu étudiée mais son rôle semble important lorsque la mégatexture est forte ou lorsque des matériaux de faible rigidité sont utilisés.

³⁷ NMPB 2008 : Nouvelle méthode de prévision du bruit routier 2008.

2.4.3.1. Catégorisation des revêtements de chaussées

Le nouveau guide d'émission du bruit 2008 du SETRA propose une méthode de calcul prévisionnel du bruit routier distinguant sur 3 catégories des revêtements de chaussées (R1, R2 et R3). Les catégories R1 et R3 correspondent respectivement aux classes les plus et moins performantes en termes d'émission sonore. Le choix des classes s'appuie sur la base de données VM du SETRA, du CERTU et du réseau des LPC répertoriant les mesures effectuées par les différents laboratoires régionaux français selon les procédures VI (cf. §2.4.2). La figure 2.43, extraite du guide du SETRA, présente un exemple de la segmentation des revêtements de chaussées en 3 catégories de performances acoustiques.

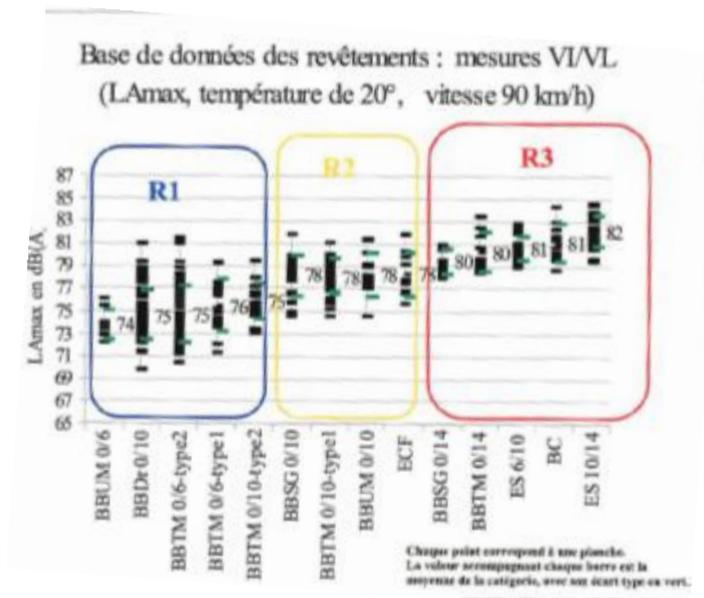


Figure 2.43 : Segmentation des revêtements de chaussées en 3 catégories de performances acoustiques, [5].

Le tableau 2.6 synthétise les revêtements de chaussées caractéristiques des catégories R1, R2 et R3 par type de techniques de revêtements.

Catégorie R1	Catégorie R2	Catégorie R3
BBTM 0/6 types 1 et 2	BBTM 0/10 type 1	BC
BBUM 0/6	BBSG 0/10	BBTM 0/14
BBDr 0/10	ECF	BBSG 0/14
BBTM 0/10 type 2	BBUM 0/10	ES 6/10
		ES 10/14

Tableau 2.6 : Catégories de revêtement R1, R2 et R3 par type de techniques de revêtement [5] ; 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).

2.4.3.2. Calcul des niveaux d'émission sonore

Les figures 2.44 à 2.47 présentent les niveaux de puissance d'émission par mètres de ligne source notées $L_{W/m}$ issues de l'application de la méthode du nouveau guide d'émission du bruit 2008 du SETRA. Les valeurs de $L_{W/m}$ prennent en compte les composantes du bruit de roulement (notée $L_{r_{W/m}}$) et du bruit "moteur" (notée $L_{m_{W/m}}$). A basse vitesse, la composante "moteur" peut s'avérer prédominante tout particulièrement pour les PL. Il est de ce fait important de considérer conjointement ces 2 composantes.

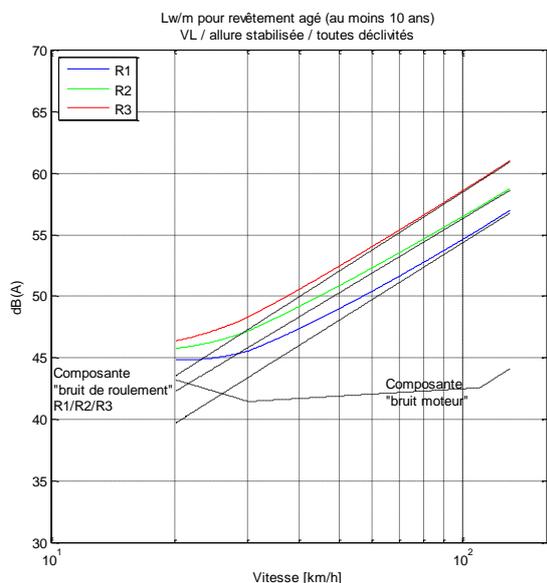


Figure 2.44

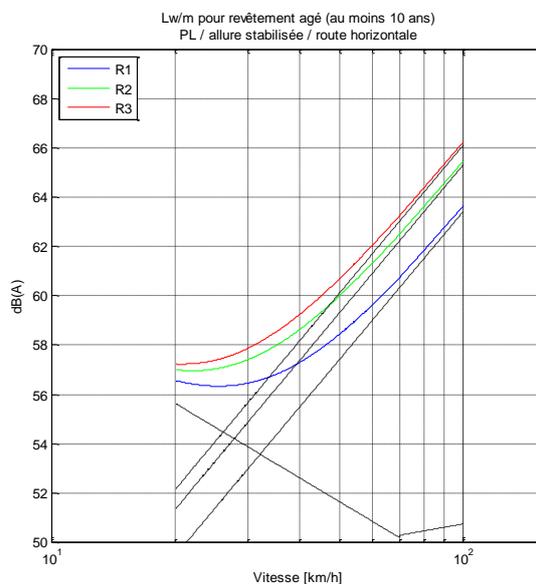


Figure 2.45

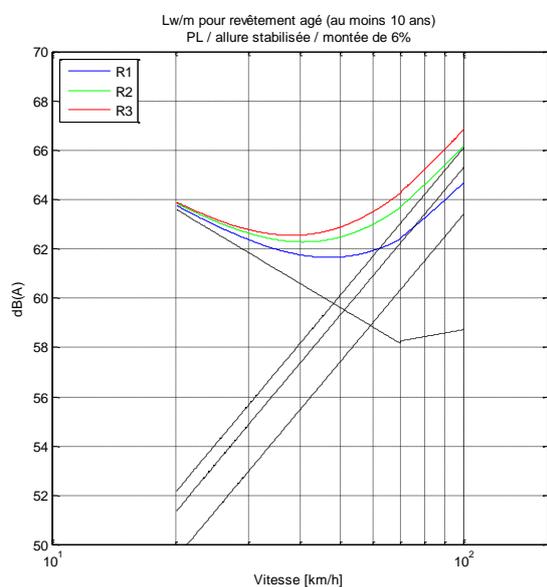


Figure 2.46

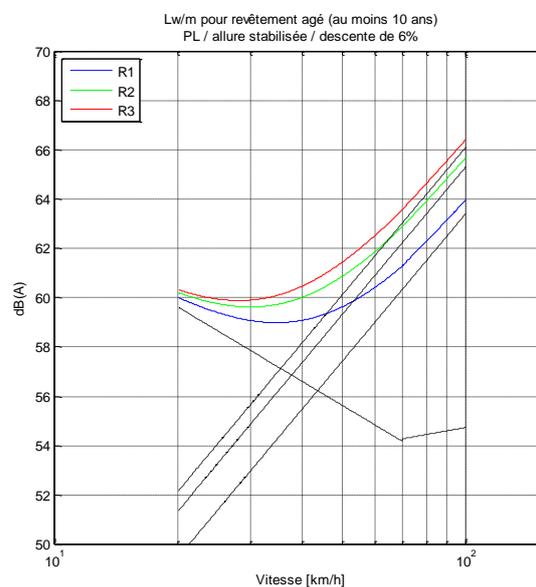


Figure 2.47

Précisons que les formules de la composante du bruit de roulement $L_{r_{W/m}}$ correspondent pour chaque catégorie de revêtements à la moyenne d'un grand nombre de valeurs de mesure. La valeur de prévision fournie par le modèle présente, notamment de ce fait, une incertitude. A titre informatif, les valeurs de l'intervalle de confiance à 95% associé de la composante de "roulement" mesurée sont de l'ordre de ± 3 dB(A).

2.4.3.3. Calcul de l'effet revêtement

Le nouveau guide d'émission du bruit 2008 du SETRA propose une modélisation de l'effet du 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. A titre illustratif, la figure 2.48 présente l'effet revêtement en fonction de la vitesse du flot de véhicules, pour les catégories de véhicules VL et PL en allure stabilisée et sur route horizontale.

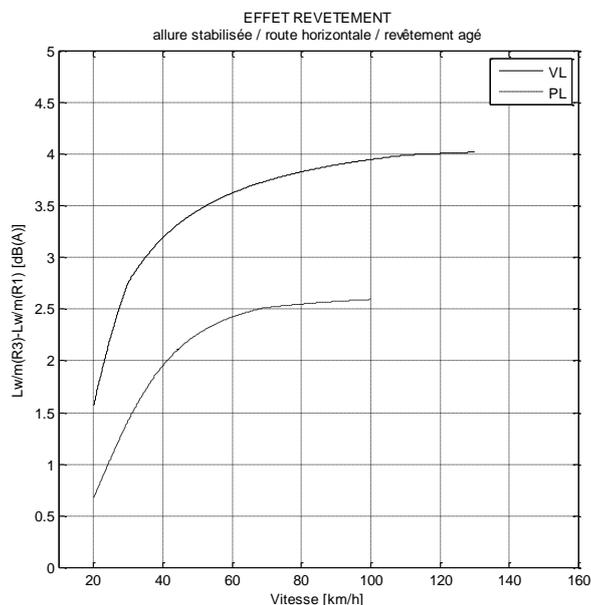


Figure 2.48 : Effet revêtement en fonction de la vitesse du flot de véhicules, pour les VL et PL en allure stabilisée et sur route horizontale ; application de la méthode du guide du SETRA, [5].

Des gains significatifs de l'ordre de 2 à 4 dB(A) peuvent être obtenus même sur des sections de voirie urbaine avec des vitesses de circulation faibles comprises entre 30 et 50 km/h et un faible taux de poids lourds.

2.4.4. Performances en fonction de la vitesse

Le gain acoustique est d'autant plus fort que le bruit de roulement est prédominant et donc que les vitesses de circulation sont élevées. Le §2.4.2 présente les performances acoustiques de différents types de revêtements à des vitesses de référence de 90 km/h pour le VL et 80 km/h pour les PL. Qu'en est-il pour d'autres régimes de vitesses ? En milieu urbain où la vitesse est généralement limitée à 50 km/h, les revêtements de chaussées "silencieux" demeurent-ils moins bruyants qu'un revêtement classique ? Si oui, la réduction de bruit reste-elle significative ? Les modèles issus du nouveau guide d'émission du bruit 2008 du SETRA et d'une étude réalisée au Pays-Bas apportent des éléments de réponse.

Les figures 2.49 à 2.52 présentent les résultats issus de l'application de la méthode du guide du SETRA pour des revêtements âgés (≥ 10 ans) pour l'effet revêtement, effet correspondant au gain escompté sur le bruit de trafic résultant de l'utilisation d'un revêtement "silencieux" (catégorie R1 au sens du nouveau guide d'émission du bruit 2008 du SETRA 2008) plutôt qu'un revêtement classique (catégorie R3 au sens du nouveau guide d'émission du bruit 2008 du SETRA). Les gains attendus dépendent de différents paramètres, tels que le type de véhicule, la vitesse du flot de véhicules, l'allure (stabilisée, accélération ou décélération) et la déclivité.

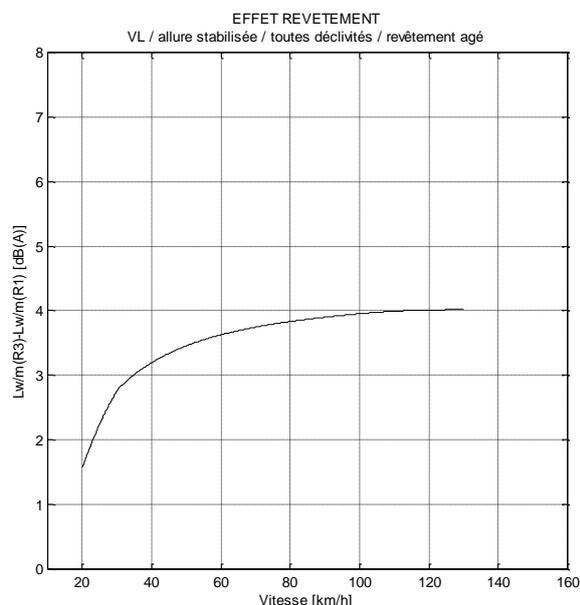


Figure 2.49

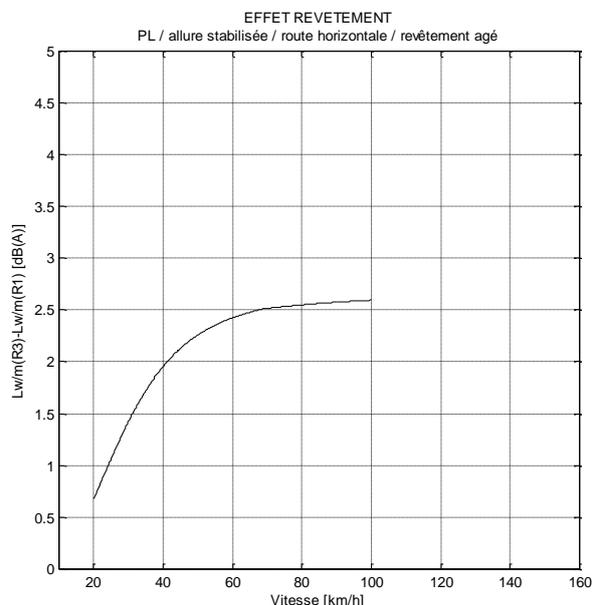


Figure 2.50

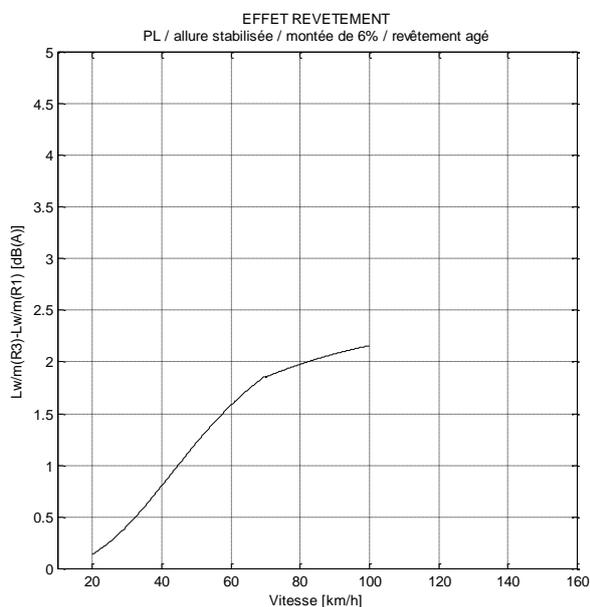


Figure 2.51

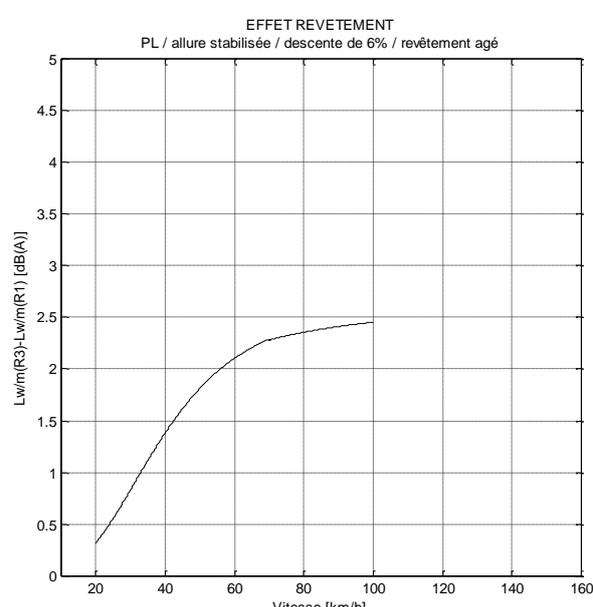


Figure 2.52

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

Une déclivité n'affecte pas le niveau d'émissions VL (pour des déclivités inférieures à 6%. 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 supérieur à 2 dB(A) qu'à partir de 80 km/h. En descente de 6% par contre, l'effet revêtement dépasse 2 dB(A) à partir de 55 km/h.

Concernant l'étude réalisée au Pays-Bas dans le cadre du programme de recherche IPG [8], les performances des revêtements ont été évaluées par modélisation en fonction de la vitesse autorisée de déplacement des véhicules. Les résultats sont systématiquement comparés aux performances d'un revêtement de référence : revêtement bitumé dense (0/16) ("*dense asphalt concrete 0/16*"). La figure 2.53 illustre les résultats de cette étude pour les PL. Globalement, on constate que plus la vitesse est élevée et plus le bruit de contact pneumatique / chaussée est élevé. Des types de revêtement apportent un gain significatif à toutes les vitesses par rapport au revêtement de référence, en particulier le BBDr bicouche ("*2-layered PA*") et le BBTM ("*Microlayer*").

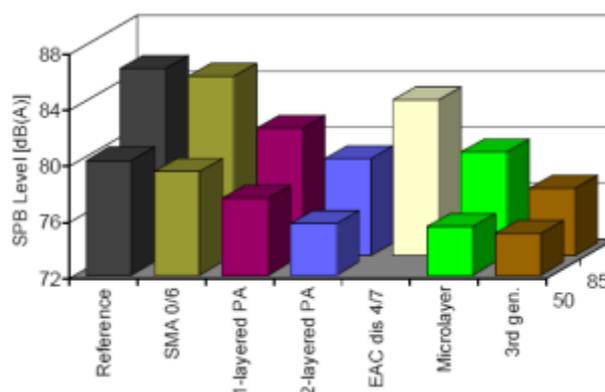


Figure 2.53 : Performances acoustiques de différents types de revêtement de chaussées en fonction de la vitesse, application aux PL, [8].

Nous avons vu au §1.2.5 que la contribution du bruit de contact pneumatique / chaussée dans l'émission sonore d'un véhicule en mouvement augmentait avec la vitesse. A l'inverse, plus la vitesse de déplacement est réduite et plus le bruit de contact pneumatique / chaussée est réduit. Le bruit du groupe motopropulseur devient alors prédominant. Par conséquent l'impact de la réduction de cette source de bruit au moyen du revêtement silencieux à moins d'effet dans les basses vitesses. Toutefois certains types de revêtements de chaussées offrent des réductions significatives dès 50 km/h. Le tableau 2.7 et les figures 2.54 et 2.55 synthétisent les résultats des travaux d'IPG et illustrent ce propos. Les résultats sont présentés pour les VL et les PL en fonction des différentes catégories de revêtement et pour différentes vitesses. Les variations de niveau sonore sont systématiquement comparées aux performances d'un revêtement de référence : revêtement bitumé dense (0/16) ("*dense asphalt concrete 0/16*").

Type	VL			PL	
	50 km/h	80 km/h	110 km/h	50 km/h	85km/h
SMA 0/6	1.1	2.1	2.8*	0.8	0.6
BBDr monocouche	-0.2	2.0	3.5	2.0*	4.3
BBDr bicouche	3.7	4.9	5.7	4.6	6.5
BBTM	4.0*	5.0*	7.0*	5.0*	6.0*

Tableau 2.7 : Atténuation sonore en dB(A) pour les véhicules légers, poids lourds et pour différents types de revêtement de chaussées par rapport à un revêtement bitumé dense (0/16) ; les valeurs positives correspondent à une réduction du bruit (*valeurs moyennes ou extrapolées), [8].

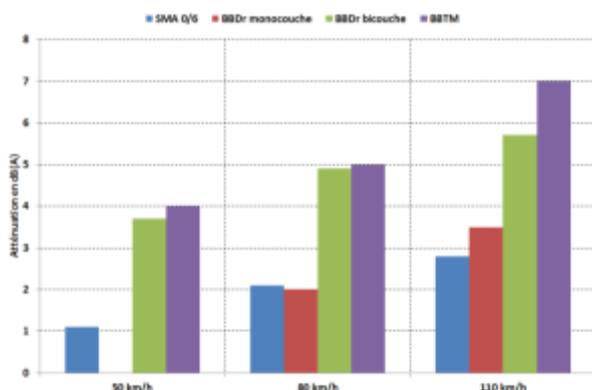


Figure 2.54 : Atténuation sonore en dB(A) pour les véhicules légers et pour différents types de revêtement de chaussées par rapport à un béton bitumé dense (0/16).

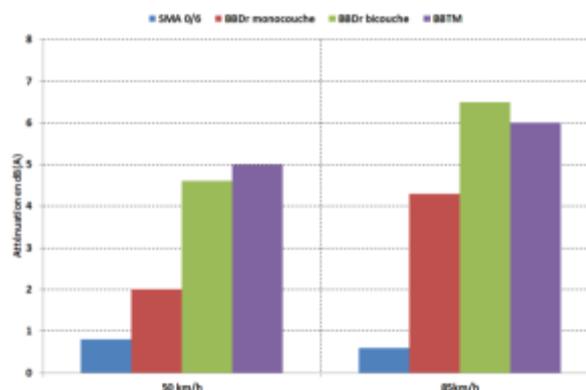


Figure 2.55 : Atténuation sonore en dB(A) pour les poids lourds et pour différents types de revêtement de chaussées par rapport à un béton bitumé dense (0/16).

On constate qu'en fonction des vitesses, des différences existent entre les différents types de produits. A ce stade des recherches aux Pays-Bas, les modèles de revêtement de type couches minces (BBTM) et les revêtements drainants double couche semblent les plus performants dans les régimes de vitesse limitée à 50 km/h en milieu urbain. Précisons toutefois, que ces résultats sont issus de la modélisation.

Le § 3.4 complète ces informations par des données issues de mesures sur site, sur différents types de chaussées d'âge différent.

2.5. Vieillessement

La durée de vie d'un revêtement est définie ici comme l'effet du vieillissement dû au trafic et aux intempéries sur la performance acoustique. Ce processus et ses effets sur la performance acoustique est complexe et dépend d'un certain nombre de paramètres comme le type de surface, la porosité de la surface de la route, le trafic et l'exposition aux intempéries. Les causes de l'altération des revêtements, ainsi que leurs conséquences sur le plan acoustique, sont explicitées dans le rapport "Revêtements de routes peu bruyants à l'intérieur des localités" [2], et le programme de recherche SILVIA [1]. Nous en énumérons ci-après les principales, liées essentiellement à une modification de la texture du revêtement ou à une dégradation de la teneur en vides pour les solutions poreuses ou drainantes.

Les performances acoustiques des revêtements de chaussée "silencieux" diminuent dans le temps. Au cours du vieillissement de ces produits, les phénomènes observés sont d'une part l'apparition de rugosité sur la texture de surface en raison de l'arrachement de granulats en surface et d'autre part pour les drainants l'augmentation de la résistance à l'écoulement de l'eau en raison de l'obstruction des vides. La perte de la propriété de drainage du produit provoque également la perte de la capacité d'absorption acoustique du produit.

Les couches minces s'avèrent des produits avec une durée de vie acceptable et des coûts modérés pour des caractéristiques de réduction du bruit intéressantes.

2.5.1. Dégradation mécanique

L'usure mécanique provoque une altération de la texture et une dégradation de la porosité à l'origine de modifications significatives des propriétés acoustiques des revêtements. Le polissage des granulats par les pneumatiques a un impact direct sur les performances acoustiques. Avec l'âge, la part des composantes du bruit situées dans les hautes fréquences augmente pour la plupart des revêtements. La cause en est le polissage progressif des granulats, résultant en une diminution de l'amplitude des courtes longueurs d'onde de texture. Par ce processus, l'expulsion de l'air entre le pneumatique et la chaussée est rendu plus difficile. Ce qui se traduit inévitablement par une augmentation du phénomène d'air pumping et d'une majoration du bruit à hautes fréquences. Le tableau 2.8 synthétise les principales altérations sur la texture, en précise les causes et les effets associés.

Altération	Cause	Microtexture (< 0,5 mm)	Macrotexture (0,5 à 50 mm)	Mégatexture (50 mm à 500 mm)
Arrachement de granulats			X	X
Post compactage du revêtement	Effet du trafic routier		X (modification de la rigidité)	X (modification de la rigidité)
Polissage des granulats	Effet du pneumatique	X		
Altération chimique du revêtement	Actions soutenues du climat et du sel de déneigement	X (formation de fissures, colmatage des vides des revêtements drainant)	X (formation de fissures, colmatage des vides des revêtements drainant)	

Tableau 2.8 : Principales altérations sur la texture ; causes et effets.

Par des températures élevées, le bitume peut se ramollir et la teneur en vide diminuer. Pour les revêtements ouverts ou drainants, les vides se colmatent par l'accumulation de salissures et l'arrachement de granulats rend la surface plus rugueuse. Ainsi, les propriétés acoustiques favorables diminuent, plus ou moins vite d'un revêtement à l'autre.

Le projet SILVIA [1] apporte des éléments de réponse quant à l'altération mécanique des revêtements de type BBTM et BBDr et leurs conséquences sur les performances acoustiques. Les principaux éléments sont cités ci-après.

Pour les BBTM (0/6 classe 2), la dégradation des performances acoustiques est essentiellement liée à l'altération de la texture. Selon la surface de revêtement initiale, la texture associée à des petites

longueurs d'onde (microtexture) peut être usée par l'action du trafic (polissage important des granulats du revêtement). Il en résulte des niveaux de bruit plus élevés associés au phénomène de pompage d'air (air-pumping). Pour réduire ce phénomène, il convient de privilégier un revêtement avec une capacité importante de résistance au polissage des granulats, ce qui présente aussi l'avantage de préserver de bonnes performances en résistance à la glissance.

Pour les BBDr en particulier et certaines surfaces poreuses, l'effet du vieillissement peut être particulièrement dramatique sur les performances acoustiques. Le trafic et les actions soutenues du climat obstruent les vides présents dans le revêtement, ce qui a pour conséquence de réduire l'absorption acoustique et d'augmenter de ce fait le niveau de bruit. L'utilisation de machines de décolmatage, basée sur la projection d'eau haute pression, n'a donné que des résultats partiellement satisfaisants. L'alternative proposée par les systèmes bicouches drainants développés dans le but d'accroître la résistance au colmatage n'a à ce jour pas démontré son efficacité à filtrer les détrit³⁸.

Cependant, après une période de stabilisation certains revêtements peuvent présenter une augmentation significative du bruit, d'autant plus que la surface atteint la fin de sa vie. Les revêtements bitumineux qui présentent une surface usée par de longues périodes de fort trafic (polissage des granulats de surface) et aux effets climatiques d'une l'exposition à long terme sont sujets à l'apparition de fissures et au durcissement du bitume. Ces états de surfaces contribuent à une dégradation des performances acoustiques du revêtement.

Les revêtements en béton de ciment peuvent également présenter des caractéristiques semblables. Par exemple pour les rainurés en béton, on constate après une longue période de fort trafic un effilochage des rainures (rainures moins profondes avec un intervalle plus large) qui favorise l'augmentation du niveau sonore.

Ces données viennent confirmer les résultats obtenus également en Suisse [2], qui a mis en place un suivi des revêtements routiers à l'intérieur des localités, à savoir une faible durabilité dans le temps des performances acoustiques, en raison de l'usure mécanique liée au trafic, aux intempéries et au colmatage progressif des vides des revêtements ouverts ou drainants. Généralement, la couche inférieure d'un revêtement acoustique doit être remplacée tous les 15 ans environ et la couche supérieure tous les 7 à 10 ans, soit une fréquence deux fois plus élevée qu'un revêtement classique.

Pour les BBTM, les mesures de macrotexture et de coefficient de frottement longitudinal étalées dans le temps prouvent que le liant, ou le mastic entourant les granulats, contenu dans l'enrobé a une influence déterminante sur la durabilité de ces caractéristiques. Les exemples d'évolution sous trafic illustrent le maintien de l'adhérence de bétons bitumineux modifiés, soit par ajout de fibres, soit par incorporation d'un bitume-élastomère. Précisons que pour les formulations de ce type, la réduction du bruit de roulement n'était pas l'objectif prioritaire (revêtement moyen par rapport à l'ensemble des revêtements étudiés en termes de performances acoustiques).

Les résultats des travaux de recherche explicités ci-dessus mettent en évidence que les performances acoustiques des revêtements de chaussée doivent être évaluées sur l'intégralité de leur durée de vie et pas uniquement sur leur performance initiale.

³⁸ La couche supérieure poreuse constituée de granulats de petite taille était destinée à agir comme un filtre accumulant la plupart des détrit³⁸. Les vides de la couche inférieure, construits autour de granulats de plus grande taille, devaient ainsi être épargnés de la majeure partie des détrit³⁸ obstruants. Par rapport aux solutions monocouche, cette conception devait permettre au processus de nettoyage d'être plus efficace à préserver la porosité du revêtement. Ce qui entrainerait une prolongation de la durée de vie des performances acoustiques.

2.5.2. Dégradation des performances acoustiques

Le guide du SETRA [5] propose une méthode de calcul prévisionnel du bruit routier. Cette méthode intègre une modélisation des performances acoustiques du revêtement de chaussée en fonction notamment de l'âge et du type de revêtement. Il est intéressant d'exploiter cette méthode afin d'appréhender les ordres de grandeur de la dégradation des performances acoustiques des revêtements de chaussées. Les figures 2.44 à 2.47 au § 2.4.3.2 présentent les résultats pour des revêtements âgés. Il est possible de prendre en compte l'âge du revêtement dans le calcul sous la forme d'un terme correctif noté $\Delta L_{r,w/m}$.

Cette correction s'applique exclusivement à la composante "bruit de roulement". Les figures 2.56 et 2.57 présentent respectivement les valeurs des corrections à appliquer en fonction de l'âge du revêtement et de sa catégorie (R1, R2 ou R3) pour les VL et les PL. Ainsi sur les 2 premières années d'exploitation des revêtements, les performances acoustiques sont considérées comme stables. Le vieillissement est modélisé par une dégradation progressive et régulière entre la 2^{ème} et la 10^{ème} année. La différence entre un revêtement jeune et âgé (plus de 10 ans) peut atteindre 4 dB(A) sur la composante "bruit de roulement" pour les revêtements les plus performants (catégorie R1).

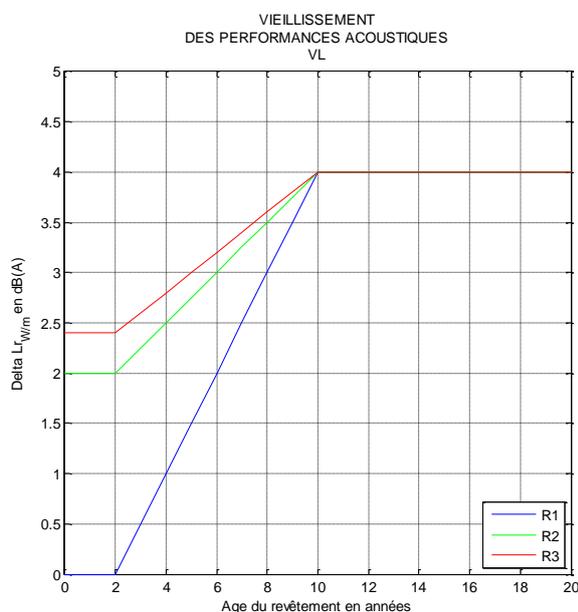


Figure 2.56 : Valeurs des corrections à appliquer en fonction de l'âge du revêtement et de sa catégorie (R1, R2 ou R3) pour les VL (Guide du SETRA)

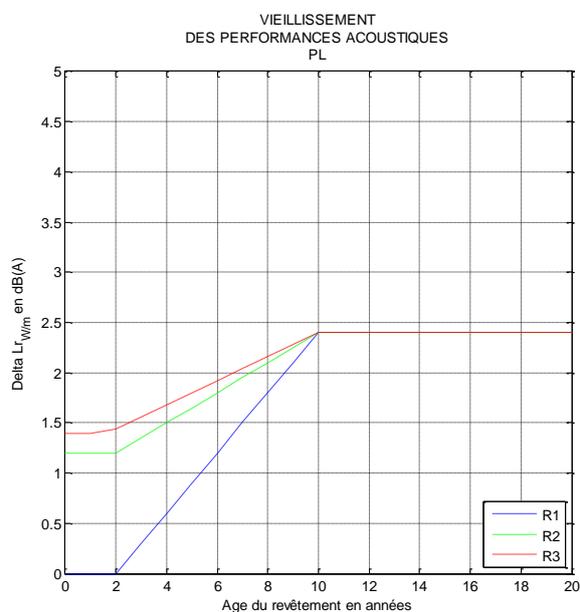


Figure 2.57 : Valeurs des corrections à appliquer en fonction de l'âge du revêtement et de sa catégorie (R1, R2 ou R3) pour les PL (Guide du SETRA)

Il est possible de confronter ces modèles à des données de mesure. On observe d'ailleurs une bonne adéquation entre les valeurs mesurées et le modèle du nouveau guide d'émission du bruit 2008 du SETRA.

La base de données "bruit de roulement" du SETRA, du CERTU et du réseau des LPC contient un certain nombre de mesures réalisées au même endroit, à des dates différentes. Dans la note de sensibilisation N°5 de mai 2011 du Groupe National des Caractéristiques de Chaussée (GNCCS) [4] une analyse de l'évolution du L_{Amax} (90 km/h) au cours du temps est proposée. Pour les exploiter, les mesures effectuées sur routes à fort trafic (autoroutes et routes à 3 ou 4 voies), des routes à plus faible trafic (routes à chaussée bidirectionnelle) sont séparées.

Les figures 2.58 et 2.59 présentent deux exemples d'application de cette analyse, sur deux revêtements de catégorie R1 : BBDr 0/10 (autoroutes et routes à 3 ou 4 voies) et BBTM 0/6 type 2 (routes à chaussée bidirectionnelle).

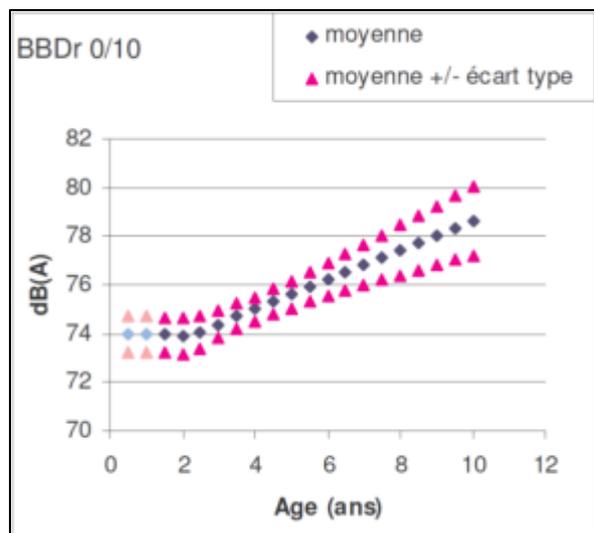


Figure 2.58 : BBDr 0/10 - Evolution des performances acoustiques dans le temps ; autoroutes et routes à 3 ou 4 voies, [4].

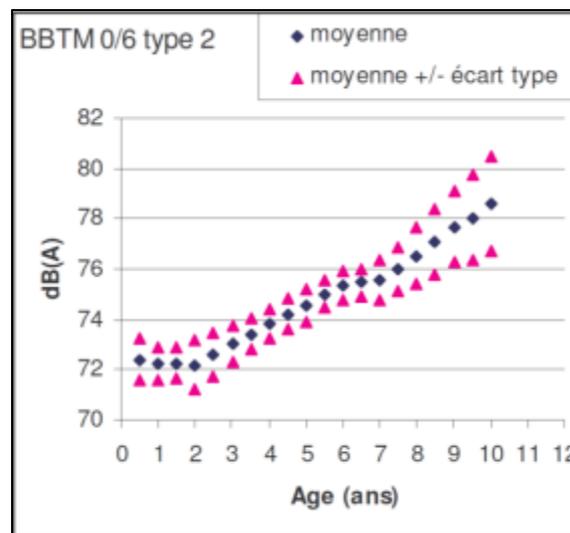


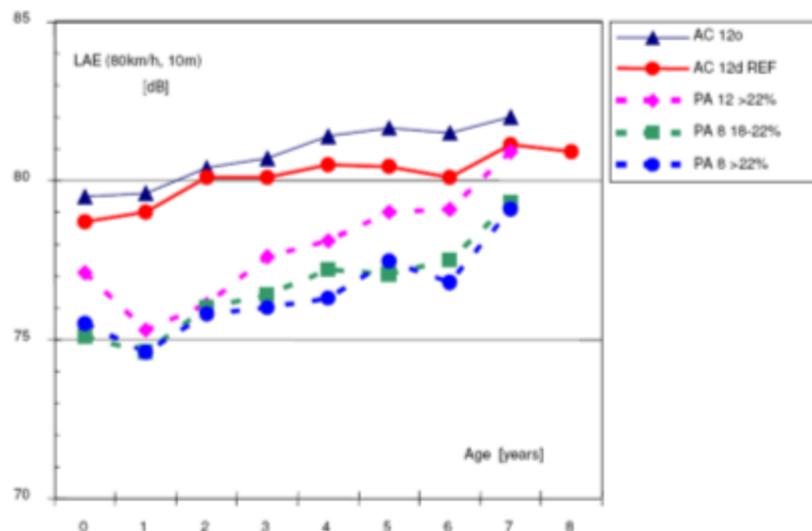
Figure 2.59 : BBTM 0/06 type 2 - Evolution des performances acoustiques dans le temps ; routes à chaussée bidirectionnelle, [4].

Pour le BBDr 0/10, on observe une augmentation du niveau sonore de l'ordre de 4 dB(A) entre l'âge de 2ans et l'âge de 10 ans. Cette augmentation est d'environ 0,5 dB(A) par an. Pour le BBTM 0/6 type 2, on note globalement une augmentation d'environ 0,8 dB/an entre l'âge de 2 ans et l'âge de 9 ans.

Les conclusions de l'étude SILVIA [1], pour le BBDr 0/10 vont dans le même sens. En dépit d'un comportement plutôt hétérogène de tous les revêtements testés, une grande partie d'entre eux a montré une augmentation du niveau sonore de 5 à 6 dB (A) pour les VL au terme d'une période d'exploitation comprise entre 1 et 10 ans. Il a également été observé que les niveaux de bruit sur les sections initialement les plus silencieuses ont tendance à augmenter au cours de cette période, tandis que sur les sections initialement les plus bruyantes tendent à rester stables pendant les premières années. Pour le BBUM (0/6 classe 2), une augmentation assez régulière des niveaux de bruit a été observée (+3 dB(A) au terme d'une période d'exploitation comprise entre 1 et 7 ans) [1].

La figure 2.60 compare l'évolution des performances acoustiques dans le temps des revêtements de chaussées drainants et à celle de bétons bitumineux denses [13]. Bien que les performances acoustiques d'un enrobé drainant restent continuellement supérieures à celles d'un revêtement classique, l'écart a tendance à se réduire avec le temps.

Figure 2.60 : Comparaison d'évolution des performances acoustiques dans le temps, revêtements de chaussées drainants et bétons bitumineux denses [13]



Le tableau 2.9 compare les valeurs de dégradation annuelle des performances acoustiques de revêtements de chaussée drainants à celles de bétons bitumineux denses en fonction des types de véhicule et de trafic (faible ou intense). La dégradation des performances d'un revêtement classique (béton bitumineux dense) est estimée à 0,1 dB(A)/an, celle des enrobés drainants est plus forte : 0,4 dB(A)/an si l'intensité du trafic est faible, 0,9 dB(A)/an pour un trafic intense (VL). Pour les revêtements de chaussée de catégorie R1 (catégorie la plus silencieuse), les valeurs proposées par le nouveau guide d'émission du bruit 2008 du SETRA de 0,5 dB(A)/an pour les VL et 0,3 dB(A)/an pour les PL concordent assez bien avec celles présentées par Descornet [13].

	dB(A) / an			
	Véhicules légers (VL)		Poids lourds (PL)	
Vitesse du flot de véhicules	Elevée	Faible	Elevée	Faible
Bétons bitumineux denses	0,1	0,1	0,1	0,1
Revêtements drainants	0,4	0,9	0,2	-

Tableau 2.9 : Estimation de la dégradation annuelle des performances acoustiques de revêtements de chaussée en fonction des types de véhicule et de trafic, revêtements drainants et bétons bitumineux denses, [13].

Le nouveau guide d'émission du bruit 2008 du SETRA propose une modélisation de l'effet du revêtement. L'effet revêtement est la différence attendu sur le bruit de trafic résultant de l'utilisation d'un revêtement de catégorie R1 plutôt qu'un revêtement de catégorie R3 (cf. §2.4.3.3). Les figures 2.61 à 2.64 présentent l'effet du revêtement en fonction de : l'âge du revêtement, la vitesse du flot de véhicules en allure stabilisée, la déclivité et du type de véhicule (VL et PL).

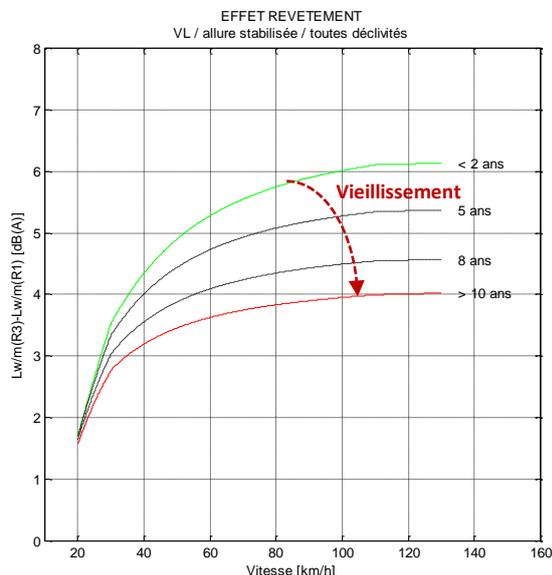


Figure 2.61

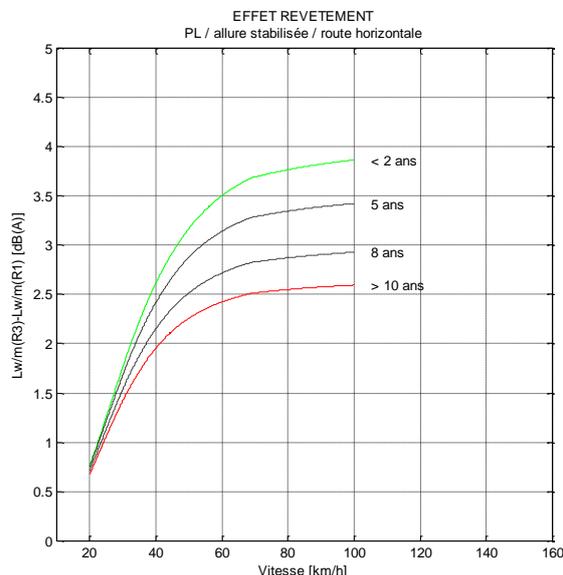


Figure 2.62

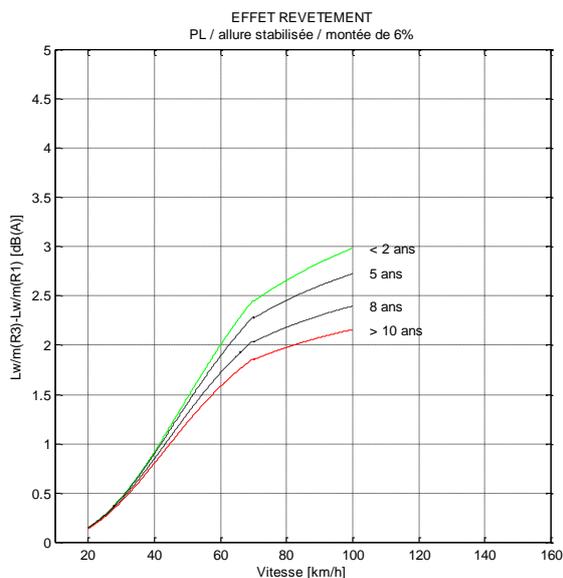


Figure 2.63

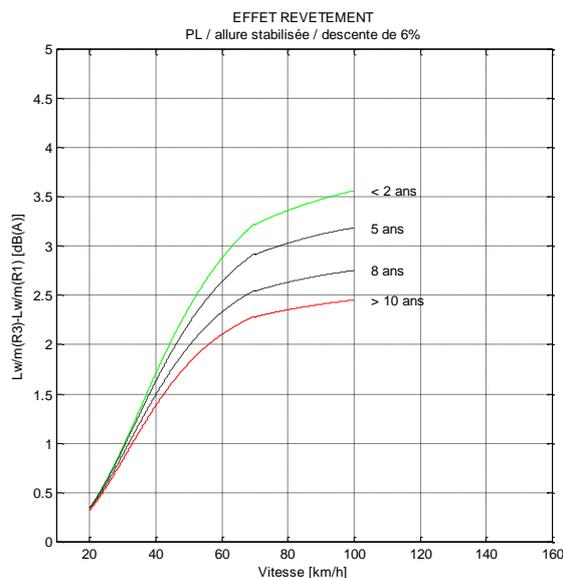


Figure 2.64

Les courbes associées aux revêtements jeunes et âgés sont très proches à basse vitesse. A ce régime de vitesses, le gain apporté l'utilisation d'un revêtement de catégorie R1 reste relativement constant dans avec les années (de l'ordre de 2 dB(A) à 25 km/h pour les VL). A haute vitesse, les courbes associées aux revêtements jeunes et âgés sont relativement éloignées. C'est sur ce régime de vitesse que l'effet du vieillissement du revêtement agit le plus sur les performances acoustique. A 100 km/h pour les VL, le gain apporté par un revêtement de catégorie R1 par rapport à un revêtement de catégorie R3 est en moyenne de 6 dB(A) à 2 ans, de 4 dB(A) à 10 ans.

Le modèle propose une approche globale ne tenant pas compte spécifiquement de l'intensité du trafic (vieillissement sous hypothèse de trafic moyen), paramètre important dans le processus de vieillissement des chaussées.

La base de données gérée par le laboratoire de Strasbourg contient plusieurs centaines de mesures de bruit de roulement au passage. Il est possible de l'exploiter afin de qualifier les revêtements ou d'étudier la pérennité des performances acoustiques des revêtements de chaussée dans le temps. La figure 2.65 présente, pour le revêtement BBTM 0/6 type 2, les niveaux sonores mesurés en fonction de l'âge du revêtement. L'analyse distingue l'importance du trafic (fort trafic : autoroutes et routes à 3 ou 4 voies / faible trafic : chaussées bidirectionnelles).

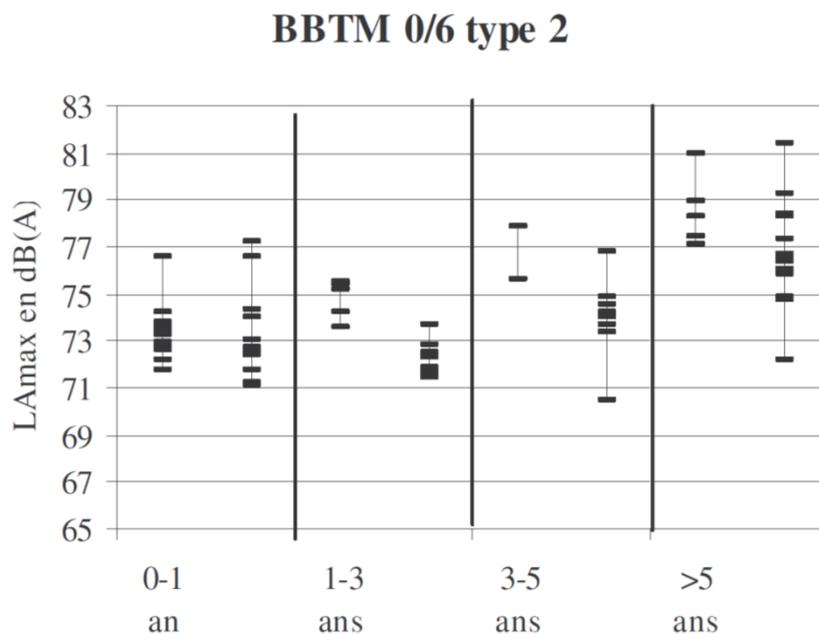


Figure 2.65 : Niveaux au passage en fonction de l'âge du revêtement ; pour chaque tranche d'âge : à gauche fort trafic, à droite faible trafic, [4].

Le faible nombre d'échantillons pour chaque tranche d'âge ne permet pas de conclure quant à l'influence du trafic sur les niveaux de bruit. On constate seulement, d'après les mesures, que le BBTM 0/6 type 2 semble avoir des niveaux sonores moins élevés sur les routes à faible trafic. Les données sont en nombre insuffisant pour poursuivre la même analyse sur les autres types de revêtements.

3. Choisir un revêtement de chaussée "silencieux"

Le choix d'un revêtement de chaussée "silencieux" ne doit pas être guidé uniquement par le gain acoustique initial qu'il permet d'obtenir mais aussi par la question de la durabilité des performances acoustiques au fil des années. Il doit par ailleurs tenir compte des conditions d'utilisation de la route (charge, composition du trafic, vitesse de circulation) et des exigences en termes de propriétés mécaniques qui en découlent. Il est plus coûteux à mettre en œuvre et à entretenir qu'une solution classique. Dans le même temps la durée de vie prévue d'un revêtement de chaussée silencieux est plus réduite.

Nous présentons dans ce chapitre, les produits le plus courants sur le marché (cf. §3.1) et les performances affichées par les concepteurs (cf. §3.2). Une attention particulière est apportée sur l'adéquation du produit aux conditions de circulation (cf. §3.3). Enfin, les retours d'expériences constituent des points particulièrement importants (cf. §3.4). Ils permettent, non seulement de suivre l'évolution dans le temps des performances acoustiques d'un revêtement de chaussée et l'altération de ses propriétés physiques, mais également de prendre en compte l'ensemble des paramètres déterminants pour les décideurs au sein des collectivités territoriales :

- contraintes de mise en œuvre,
- coût,
- maintenance...

Par exemple, lors du choix du revêtement de chaussée, un compromis doit être trouvé entre des propriétés acoustiques optimales (teneur en vides élevée) et une durée d'utilisation élevée (faible teneur en vides). Ces tendances opposées sont schématisées dans la figure 3.1. Il convient que la teneur en vides doit se situer dans le "domaine optimal". En Suisse dans le cadre du programme sur les revêtements silencieux dans les localités [2], des expériences positives ont été faites avec des enrobés contenant un volume de vide de 8 à 16 %. Ces types de revêtements sont qualifiés de "semi-denses".

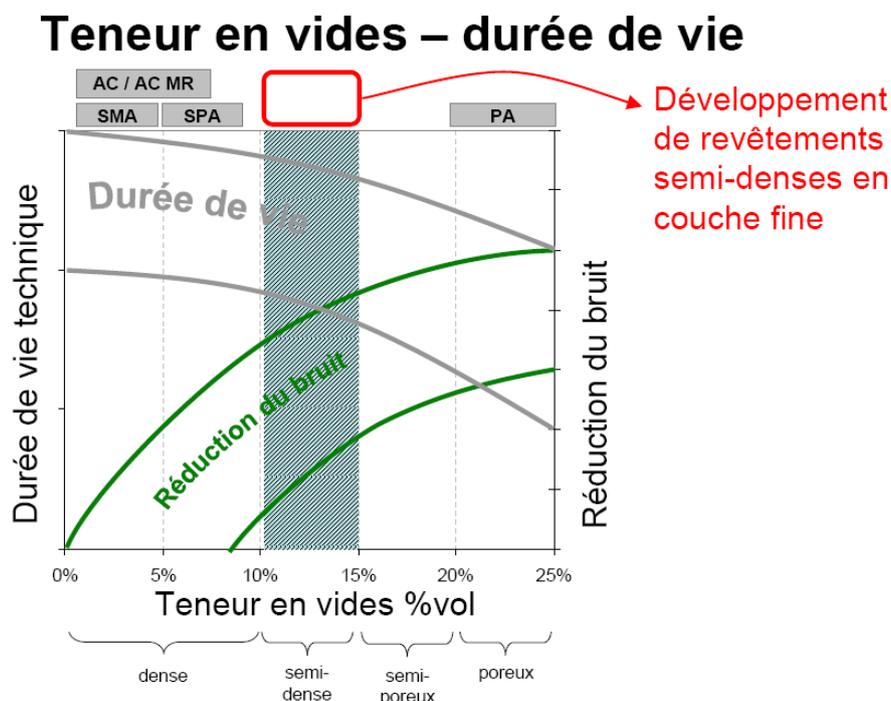


Figure 3.1 : Teneur en vides et durée de vie, [2].

3.1. Produits les plus courants sur le marché

Les produits présentant de bonnes performances acoustiques les plus couramment utilisés en France correspondent essentiellement aux revêtements de chaussée réalisés en bétons bitumineux très minces de classe 1 ou 2, et aux bétons bitumineux drainants. Dans les deux cas, les granulats utilisés sont de petite taille : 0/6 mm et 0/10 mm (BBTM 0/6-type 1 ou 2, BBTM 0/10-type 2, BBDr 0/6, BBDr 0/10). Certains nouveaux produits sont très prometteurs. Ils utilisent des tailles de granulats extrêmement réduites, tels que les BBTM de type 2, basés sur des formules granulaires discontinues, avec un calibre de granulats de 0/4 mm et présentent une absorption acoustique importante (> 20% de vides).

De nombreux produits existent sur le marché, nous ne pouvons pas en fournir une liste exhaustive. Dans son rapport "Silence ...on roule, ou comment les acteurs de la filière routière se mobilisent pour réduire les émissions sonores", l'Union Routière de France (URF) présente quelques exemples de solutions offrant des gains significatifs en termes de réduction du bruit parmi la diversité des entreprises de construction routière [51] :

- le Nanosoft® du groupe Colas qui procure une forte réduction des émissions sonores, jusqu'à 8 dB(A), pendant les tests par rapport à un enrobé témoin - selon les études menées par l'entreprise, l'adhérence est élevée et pérenne, avec une excellente drainabilité de surface ;
- le Viaphone® d'Eurovia, microbéton bitumineux obtenu par mélange d'une formule granulaire spécifique, d'un bitume modifié et de fibres. Les études d'Eurovia indiquent qu'il présente une excellente adhérence et apporte une réduction sonore significative ;
- le Nanophone® d'Eiffage Travaux Publics, béton bitumineux très mince (BBTM), dont la composition granulaire est optimisée et permet la réduction des émissions sonores des véhicules et leur résistance au roulement ;
- le Microville® de Screg, béton bitumineux très mince (BBTM), dont la composition granulaire est optimisée. Ses performances acoustiques lui ont valu l'attribution d'un Décibel d'Or³⁹ en 1992.

Cette diversité de produits et d'entreprises témoigne de l'intérêt de l'ensemble de la profession à développer des revêtements de chaussée silencieux. Compte-tenu de la diversité des produits existants, nous présentons à titre illustratif au §3.2 quelques produits affichant des performances acoustiques au jeune âge parmi les plus remarquables.

³⁹ Le Conseil National du Bruit, organisme consultatif placé auprès du Ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et du logement, met à l'honneur les initiatives ayant contribué de façon exemplaire à l'amélioration de l'environnement sonore en organisant le concours annuel des Décibels d'Or.

3.2. Performances affichées

Les produits affichant des performances acoustiques au jeune âge parmi les plus remarquables présentent des valeurs L_{Amax} réalisées en véhicules isolés (VI), à 90 km/h de l'ordre de 68 à 70 dB(A) pour les VL (cf. §2.4.2.1). Ces produits utilisent des tailles de granulats extrêmement réduites 0/4 ou 0/6 mm. Nous présentons dans le tableau 3.1 trois exemples de ce type de produit.

Nom du produit	MINIPHONE	MICROVILLE	NANOSOFT
Fabriquant	SACER	SCREG	COLAS
Type de revêtement	Béton bitumineux mince ou très mince	Béton bitumineux très mince	Béton bitumineux mince ou très mince
Granulométrie	0/6 mm discontinue	0/6 mm discontinue 2/4 mm (parfois 0/4 mm)	0/4 mm discontinue
Epaisseur	25 à 35 mm	20 à 30 mm	20 à 40 mm Absorption du bruit optimale entre 30 et 35 mm d'épaisseur
Liant	En général, bitume polymère de la gamme SACERFLEX (niveau de modification en fonction du trafic et des sollicitations)	Bitume élastomère BITULASTIC E ou bitume pur avec addition de fibres.	Bitume modifié par des élastomères de type SBS
Usage principal	Construction neuve ou l'entretien des voiries urbaines ou rocade, bien adapté aux trafics moyens ou élevés	Destiné en particulier aux voiries urbaines. Entretien des chaussées ayant une structure satisfaisante, chaussées neuves sur assises bitumineuses, ou sur assises traitées aux liants hydrauliques surmontées d'une couche de liaison ou d'un système limitant la remontée des fissures de retrait.	Adapté au milieu urbain, et périurbain même pour des vitesses ≤ 50 Km/h. Couche de roulement de chaussée neuve ou entretien sur tous les réseaux routiers quel que soit le trafic.

Tableau 3.1 : Exemple de produits affichant des performances acoustiques particulièrement remarquables au jeune âge.

Cette nouvelle génération de produits est trop jeune pour disposer d'un nombre conséquent d'études concernant les performances après plusieurs années d'exploitation sous différentes conditions (vitesses de circulation, intensité du trafic, pourcentage de PL, conditions météorologiques...).

3.3. Prise en compte des conditions de circulation

Le choix du revêtement de chaussée doit prendre en compte plusieurs aspects, en particulier la vitesse de circulation, l'intensité et la nature du trafic et l'environnement de la voirie. Le tableau 3.2 extrait des travaux d'IPG [8] présente le système de priorisation mis en œuvre aux Pays-Bas.

Type of road	Max. speed (km/h)	Porous Asphalt (PA)	2-layer Porous Asphalt (2PA)	Texture optimised cement concrete (TOCC)	Silent thin surfacing (STS)	Silent block paving (SBP)
Motorway	120	+	+	+		
Rural trunk road	100	+	+	+	+	
Rural distributor road	80		+	+	+	
Rural lower class road	60				+	
Urban trunk road	70				+	
Urban distributor road	50				+	+
Urban lower class road	30					+

Tableau 3.2 : Système de priorisation mis en œuvre aux Pays-Bas, [8].

Concernant le cas particulier des zones urbaines limitées à 30 km/h (Zone 30), si cette orientation est retenue pour des raisons exclusivement acoustiques, il convient de bien évaluer les deux alternatives suivantes :

- limitation de la vitesse à 30 km/h avec un revêtement usuel,
- limitation de la vitesse à 50 km/h avec un revêtement silencieux.

En effet selon le régime de vitesse utilisé, une circulation à 30 km/h sur un revêtement de chaussée usuel peut s'avérer plus bruyante qu'une circulation à 50 km/h sur un revêtement silencieux (cf. §1.2.5 - figure 1.4). Aux Pays-Bas, le programme de recherche IPG suggère de recourir à des pavés acoustiques.

3.4. Prise en compte des conditions climatiques

Les conditions climatiques constituent un facteur de premier ordre dans la conception des revêtements de chaussées, tout particulièrement les aspects concernant le vieillissement mécanique. Un revêtement de chaussée doit être adapté au climat de la région dans laquelle il va être implanté.

Ainsi, les climats caractérisés par de faibles amplitudes thermiques, de type océanique ou méditerranéen, permettent de minimiser la prise en compte des effets thermiques ou dérivés (effet du gel, résistance aux engins de raclage et de déverglaçage...) dans le cadre du développement de solutions silencieuses. En revanche, le développement de solutions adaptées à des climats présentant de fortes variations de température, tel que le climat continental, est fortement contraint par la prise en compte des effets thermiques ou dérivés.

En France, le nord-est du pays doit impérativement prendre en compte ce facteur dans le choix d'un revêtement de chaussée. Peu utilisé jusqu'à présent en France, le SMA constitue une solution intéressante à mettre en œuvre dans l'est de la France. Il présente une meilleure tenue que les bétons bitumineux aux agressions des engins de raclage et aux produits de déverglaçage. Il offre de ce fait une meilleure qualité en termes de capacités financières que les bétons bitumineux posés à

chaud⁴⁰. En outre, cette technique propose des revêtements de même niveau de macrotexture que les enrobés minces ou très minces, offrant donc la même sécurité en adhérence pour les usagers. Ils offrent également un niveau de bruit de roulement comparable à celui des BBSG ou des BBM, mais plus élevé que celui enregistré sur les enrobés drainants ou les bétons bitumineux silencieux de dernière génération. Dans ces régions, le SMA (35 mm) constitue une alternative intéressante pour remplacer le BBM, voire le BBSG (60 mm).

Sur le territoire francilien davantage de possibilités sont offertes aux collectivités territoriales dans le choix des revêtements de chaussée silencieux.

3.5. Retour d'expériences

Nous n'avons pour l'instant pu réunir qu'un nombre limité d'études : le projet européen SILVIA [1], l'étude suisse "Revêtements de routes peu bruyants à l'intérieur des localités" [2], les études de la Communauté Urbaine de Lille Métropole [14] et du Conseil général des Hauts-de-Seine [47], dont les résultats sont présentés respectivement aux §3.4.1 à §3.4.4 de ce rapport. Un travail de constitution d'une base documentaire sur ce sujet serait à notre avis pertinent. Dans ce sens et afin de fournir une information complète et de qualité sur les revêtements de chaussées acoustiques, la mise en œuvre d'études mutualisées intégrant les collectivités territoriales, les laboratoires et centres techniques régionaux ou observatoires du bruit nous semble particulièrement intéressante.

3.5.1. Projet européen SILVIA

Le projet SILVIA [1] ("*Sustainable Road Surfaces for Traffic Noise Control*", également appelé FEHRL) est une initiative du Forum des laboratoires européens de recherche sur les autoroutes. Dans le cadre de ce projet européen, les performances acoustiques de différents types de revêtements de chaussées ont été mesurées par la méthode "SPB". Plusieurs revêtement de même type ont été évalués afin d'apprécier la dispersion des résultats en termes d'émission sonore. En outre d'autres facteurs de variabilité ont été pris en compte comme :

- l'âge du revêtement,
- le calibre du granulat,
- la vitesse,
- le type de véhicule.

La base de données est intéressante puisqu'elle n'est pas uniquement constituée de revêtements jeunes. Pour les 4 types de revêtements étudiés dans ce document (SMA, BBDr monocouche, BBDr bicouche et BBTM), l'âge moyen est d'environ 2 ans, le calibre moyen des granulats de 8 à 9 mm (cf. figure 3.3). Le tableau 3.3 synthétise les résultats de l'étude pour 4 types de revêtement de chaussée : SMA, BBDr monocouche, BBDr bicouche et BBTM. La figure 3.4 propose une illustration graphique pour les résultats associés aux véhicules légers.

⁴⁰ Les bétons bitumineux posés à chaud nécessitent le renouvellement périodique des couches de surface pendant la durée de vie de l'enrobé.

Etat des lieux des performances acoustiques des revêtements de chaussées

	Type	Speed	No of sites	Surface Age, yrs		SPB Level, dB(A)			Aggregate size (upper layer), mm		
				Average	Range	Average	Min	Max	Average	Min	Max
SMA	Passengers cars	50 km/h	6	1.40	0,2 - 2,0	70.6	68.6	74.1	8.6	6.0	12.8
		80 km/h	5	3.50	0,2 - 8,0	78.7	76.5	82.1	12.8	10.0	16.0
		110 km/h	11	3.20	0,2 - 7,8	82.2	78.3	86.1	10.1	8.0	16.0
	Dual-axle heavy vehicles	50 km/h	6	1.40	0,3 - 3,0	79.1	77.3	85.3	8.6	6.0	12.8
		70 km/h	1	1.00		81.9			16.0		
		85 km/h	10	2.80	0,2 - 7,8	85.2	82.9	87.0	10.1	8.0	16.0
	Multi axle heavy vehicles	50 km/h	3	1.80	0,3 - 3,0	81.6	79.6	83.3	9.9	6.0	12.8
		70 km/h	1	1.00		86.8			16.0		
		85 km/h	11	3.20	0,2 - 7,8	88.3	84.2	91.0	10.1	8.0	16.0
BBDr monocouche	Passengers cars	80 km/h	2	4.10	0,2 - 8,0	76.1	76.0	76.2	14.0	14.0	14.0
		110 km/h	4	3.20	0,1 - 6,4	79.1	76.9	82.0	10.0	8.0	16.0
	Dual-axle heavy vehicles	4	3.20	0,1 - 6,4	82.1	79.4	83.8	10.0	8.0	16.0	
	Multi axle heavy vehicles	4	3.20	0,1 - 6,4	85.2	84.5	86.3	10.0	8.0	16.0	
BBDr bicouche	Passengers cars	50 km/h	18	2.40	0.1 - 4.9	66.7	62.5	70.4	6.0	5.0	8.0
		80 km/h	4	1.00	0.2 - 1.4	69.6	68.3	70.9	7.0	7.0	7.0
		110 km/h	4	0.25	0 - 0.6	78.0	76.5	80.0	7.3	5.0	11.0
	Dual-axle heavy vehicles	4	0.25	0 - 0.6	81.8	79.7	83.8	7.3	5.0	11.0	
	Multi axle heavy vehicles	4	0.25	0 - 0.6	82.5	80.3	86.6	7.3	5.0	11.0	
BBTM	Passengers cars	50 km/h	6	0.50	0 - 2,0	65.8	61.5	68.9	6.0	6.0	6.0
		80 km/h	2	0.50	0 - 1,0	72.4	70.3	74.4	6.0	6.0	6.0
		110 km/h	7	3.30	0,3 - 4,9	82.3	79.4	85.7	8.0	8.0	8.0
	Dual-axle heavy vehicles	50 km/h	3	1.00	0,5 - 2,0	77.1	75.5	78.7	6.0	6.0	6.0
		85 km/h	7			84.2	81.8	86.3	8.0	8.0	8.0
	Multi axle heavy vehicles	7	0.30		85.8	82.9	88.0	8.0	8.0	8.0	

Tableau 3.3 : Performances acoustiques selon la méthode SPB pour les revêtements de type SMA, BBDr monocouche, BBDr bicouche et BBTM (SILVIA, [1]).

Figure 3.3 : Dispersion de l'âge moyen des revêtements et du calibre moyen des granulats dans la base de données SILVIA pour les revêtements de type SMA, BBDr monocouche, BBDr bicouche et BBTM (SILVIA, [1]).

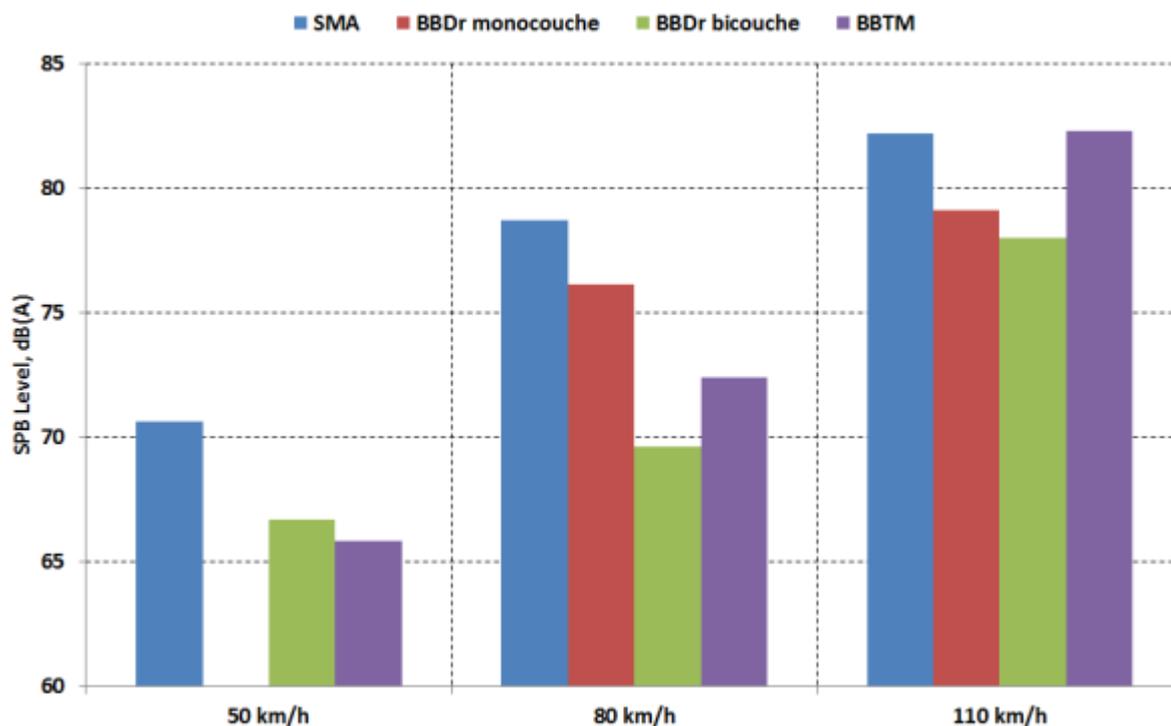
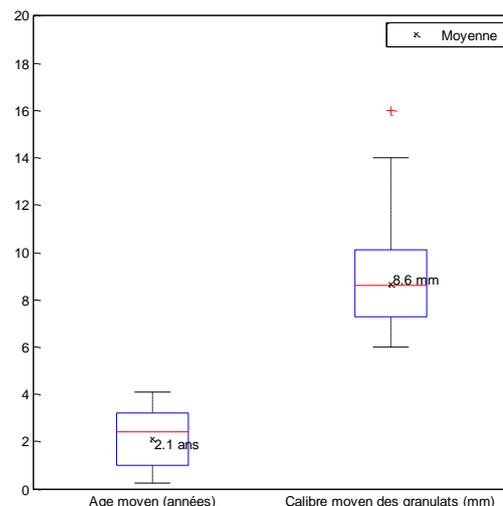


Figure 3.4 : Performances acoustiques de différents types de revêtement de chaussées en fonction de la vitesse, application aux VL (SILVIA, [1]).

Les résultats de mesures confirment les valeurs théoriques présentées au §2.4.4. On constate tout particulièrement que dès 50 km/h les atténuations sonores liées au revêtement de chaussée sont significatives :

- de l'ordre de 4 à 5 dB(A) pour les VL⁴¹,
- et de 2 dB(A) pour les PL.

⁴¹ 70,6 dB(A) pour le SMA et 66,7 dB(A) pour le BBDr bicouche.

3.5.2. Programme de recherche "Revêtements de routes peu bruyants à l'intérieur des localités"

Ce chapitre rend compte d'une expérience menée en Suisse [2] depuis 2003 et toujours en cours à l'heure de la rédaction de ce rapport. Ces travaux ont pour objectif l'étude de l'évolution des performances mécaniques et acoustiques des revêtements de chaussées sur plusieurs années.

Les éléments présentés sont extraits de l'étude "Revêtements de routes peu bruyants à l'intérieur des localités - Rapport annuel 2010" de l'ORFOU (Office Fédéral des Routes) et de l'OFEV (Office Fédéral de l'environnement). En Suisse, plus de 80 % des personnes touchées par un bruit routier affichant des valeurs supérieures aux limites d'émissions se trouvent à l'intérieur de localités. Pour trouver des solutions ciblées, l'OFEV et l'ORFOU ont lancé conjointement en 2003 le programme de recherche "Revêtements peu bruyants à l'intérieur des localités". Le but était de mettre à disposition des recommandations techniques unifiées, sous forme de formulations de revêtements types.

3.5.2.1. Approche méthodologique

21 revêtements de chaussées présentant des performances acoustiques intéressantes ont fait l'objet d'un suivi technique (mesurages) sur des axes de voirie limitée à 50 km/h au maximum. 12 revêtements de chaussées acoustiques ont ainsi été posés et évalués sur des tronçons situés à l'intérieur de localités. Le programme a en outre inclus 9 revêtements acoustiques existants, pour lesquels de bonnes performances avaient été enregistrées. Les tableaux 3.5 et 3.6 explicitent la typologie des 21 revêtements étudiés (nomination abrégée des types de revêtements - cf. tableau 3.4)

<i>AC MR</i>	<i>Macrorugueux</i>
<i>AC</i>	<i>Asphalt Concrete (béton bitumineux dense)</i>
<i>Gu</i>	<i>Revêtement contenant du granulat de caoutchouc</i>
<i>MA</i>	<i>Mastic Asphalt (asphalte coulé)</i>
<i>PA</i>	<i>Porous Asphalt (béton bitumineux drainant)</i>
<i>SPA</i>	<i>Splittasphalt (SMA)</i>

Tableau 3.4 : Nomination abrégée des types de revêtements étudiés dans l'étude suisse, [2].

Tronçon pilote	Nouveau revêtement pilote	Provenance des grains	Longueur [m]	TJM	Date de pose
Kreuzlingen TG	PA 4/PA 8 bicouche ³	Walliswil	150	11500	04.08.2004 ³
Sargans SG	PA 8/PA 16 bicouche ¹	Hagerbach	320	6170	17.09.2004 ¹
Tourtemagne VS	SPA 4	Famsa	550	14500	28.09.2004
	AC MR 4 EOS granulats caoutch.	Stahl Gerlafingen	250		29.09.2004
	AC MR 4 EOS	Stahl Gerlafingen	250		29.09.2004
	AC MR 4	Famsa	550		30.09.2004
Sargans SG	AC MR 4	Gasperini	300	6170	20.09.2004
	AC MR 8 EOS granulats caoutch.	Stahl Gerlafingen	300		13.09.2004
Zuchwil SO	AC MR 8 EOS	Stahl Gerlafingen	180	8924	31.08.2004
Lucerne LU	Whisper-Grip® ²	Chromerzschlacke	150	16100	31.08.2004 ²
Altendorf SZ	SPA 8 épaisseur 15 mm ²	Gasperini	110	14500	06.10.2005 ²
	SPA 8 épaisseur 20 mm ²	Gasperini	130		06.10.2005 ²

¹ Supprimé de la campagne de mesurage à partir de 2006 en raison d'un important arrachement de grains ou du remplacement du revêtement.

² Supprimé de la campagne de mesurage à partir de 2007 en raison d'une réduction insuffisante du bruit.

³ PA4 / PA8 remplacé à l'été 2011.

Tableau 3.5 : Typologie des revêtements étudiés (12 tronçons pilotes nouveaux), [2].

Les 12 revêtements expérimentaux réalisés ont été posés sur les 7 tronçons pilotes sélectionnés. A une exception près, tous les revêtements étudiés sont des variantes des types d'enrobés suivants : "asphalte poreux" (PA), Splittasphalt (SPA) et Macrorugueux (ACMR).

Les enrobés se différencient les uns des autres par leur calibre de granulats 0/4 mm ou 0/8 mm, par la nature et la provenance des granulats sélectionnés ou par l'utilisation ou non de granulats de caoutchouc. Le revêtement Whisper-Grip® constitue ici une exception. Il s'agit d'une couche de résine époxy recouverte de scories de minerai de chrome sous la forme de granulats de calibre 1/3 mm.

Tronçon pilote	Nouveau revêtement pilote	Provenance des grains	Longueur [m]	TJM	Date de pose
Leuggern AG	PA 8 ⁵		90	2000	2004
	SPA 8		90	2000	
	MA 8 gravillonnage 2/4		60	2000	
	MA 8 gravillonnage 3/6		60	2000	
Sargans SG	AC 11		320	6170	2004
Sessa TI	AC 11 Leca	Gasperini	1000	1086	2002
Bellinzone TI	AC 11 Leca	Gasperini	320	19800	2004
Les Evouettes VS	Colsoft 8® ⁴			6000	2002 ⁴
Grossgurmels FR	Wecophone 6®	Famsa	600	10400	2003

⁴ Mesurages pas effectués tous les ans en raison d'une réduction insuffisante du bruit.

⁵ PA8 plus mesuré en 2010 en raison d'un important arrachement de grains.

Tableau 3.6 : Typologie des revêtements étudiés (9 tronçons existants), [2].

Tous les tronçons ont fait l'objet d'un suivi technique (mesurages) depuis 2003. Les résultats ont été saisis dans une base de données, et les valeurs caractéristiques, techniques et acoustiques, ont été analysées. L'application du modèle StL- 86+ permet de comparer les résultats des mesures acoustiques « au passage » et « en champ proche ». Des rapports d'évaluations des performances acoustiques ont été produits périodiquement pendant la durée de l'étude.

3.5.2.2. Résultats

Les figures 3.5 et 3.6 présentent respectivement les performances acoustiques des revêtements "pilote" et "existant" pour un trafic mixte comprenant 8 % de poids lourds avec la méthode SPB.

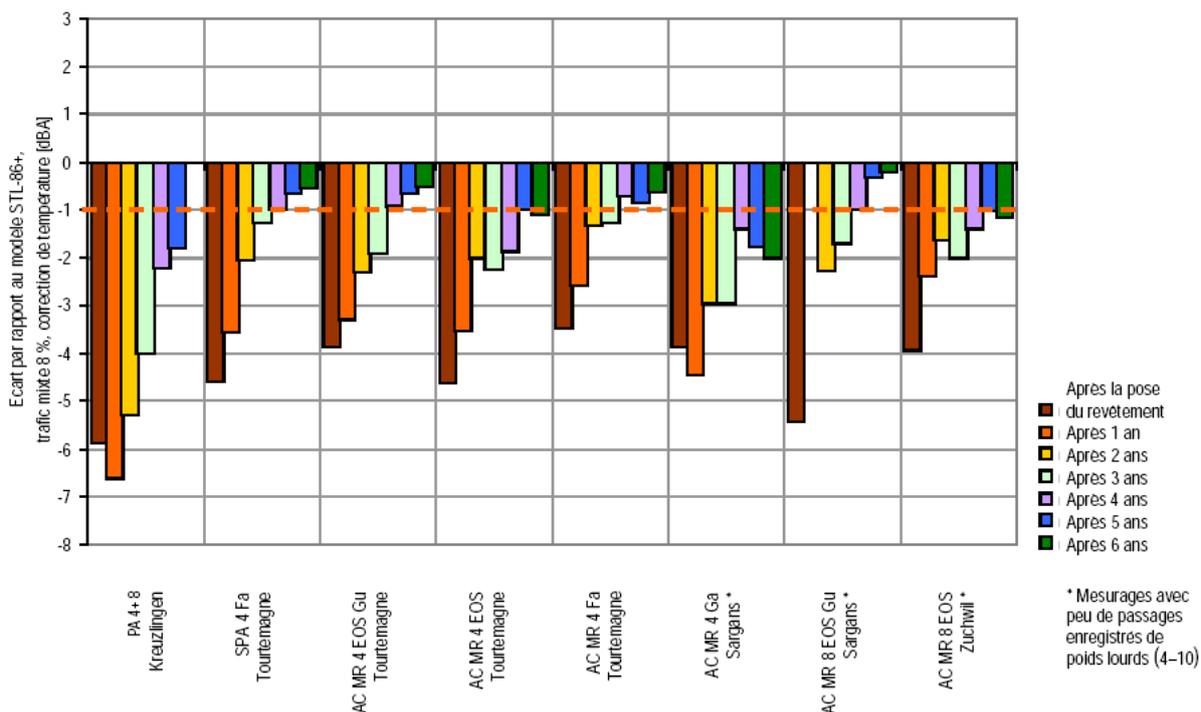


Figure 3.5 : Evolution des qualités acoustiques des revêtements nouveaux pour le trafic mixte pendant 6 ans. Les écarts ont été calculés pour un trafic mixte avec 8 % de poids lourds (PL) ; revêtements pilotes, [2].

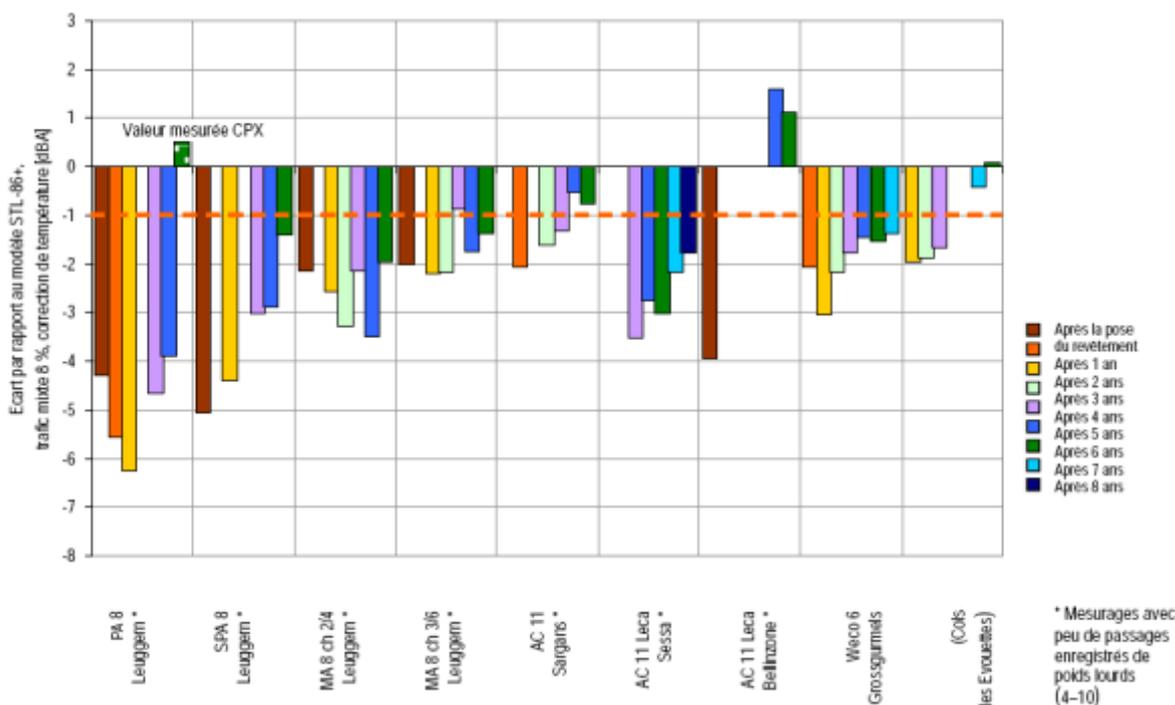


Figure 3.6 : Evolution des qualités acoustiques des revêtements nouveaux pour le trafic mixte pendant 6 ans. Les écarts ont été calculés pour un trafic mixte avec 8 % de poids lourds (PL) ; revêtements existants, [2].

a. Résultats à court et moyen terme (en 2007, 4 ans après le démarrage du projet)

Un gain acoustique initial de 3 à 6 dB(A) par rapport à des revêtements de chaussée standard avait été mesuré pour l'ensemble des revêtements nouvellement posés (cf. figure 3.7). Un bilan détaillé a été effectué au terme des 3 premières années d'observation. Ce premier bilan met en évidence :

- une diminution plus ou moins marquée des performances acoustiques pour l'ensemble des nouveaux revêtements expérimentaux et la plupart des revêtements existants. La baisse observée atteint 1 à 3 dB(A) durant les trois premières années, pour ralentir ensuite. Parmi les nouveaux revêtements de chaussée semi-denses posés, l'AC MR 4 à Sargans présentait les meilleures qualités acoustiques après trois ans d'exploitation ;
- peu de détérioration des performances acoustiques pour la catégorie des enrobés drainants (> 20% de vides - cf. figure 3.8) et une faible dégradation pour les revêtements de chaussée à forte teneur en vide (> 12% de vides - cf. figure 3.9) ;
- une forte diminution des performances acoustiques pour la plupart des revêtements de chaussées denses (cf. figure 3.10).

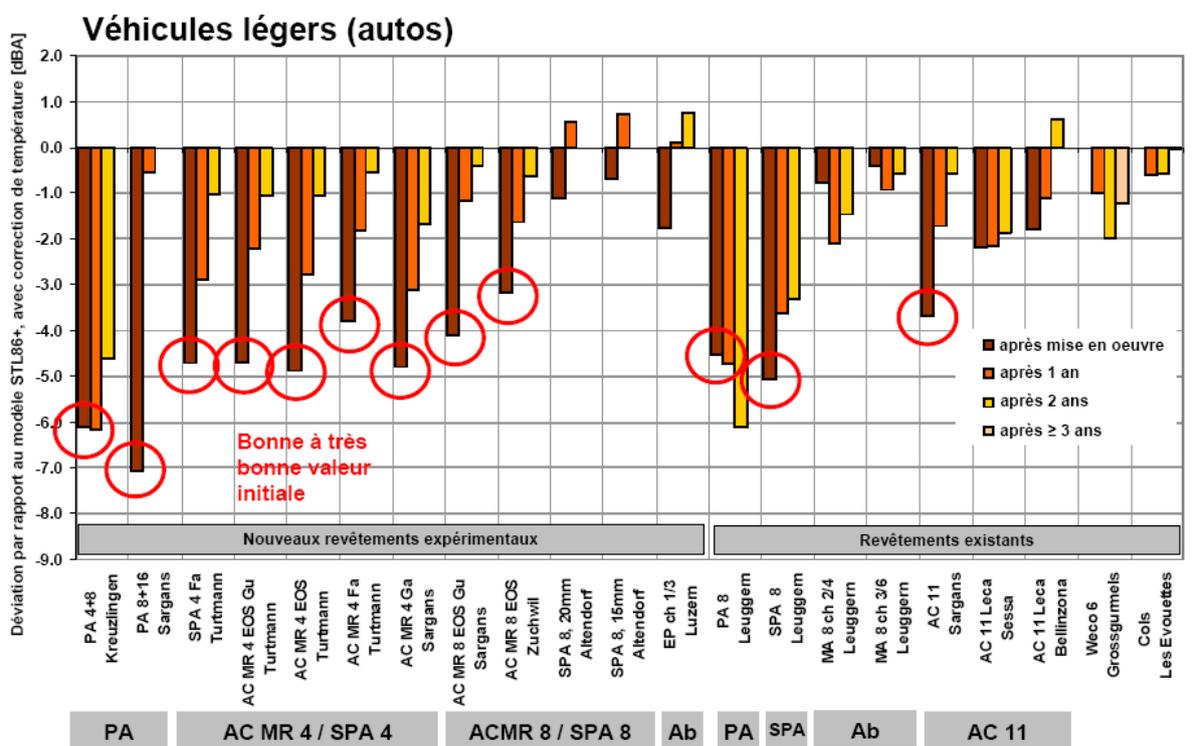


Figure 3.7 : Evolution des qualités acoustiques des revêtements ; focus sur performances au jeune âge, [2].

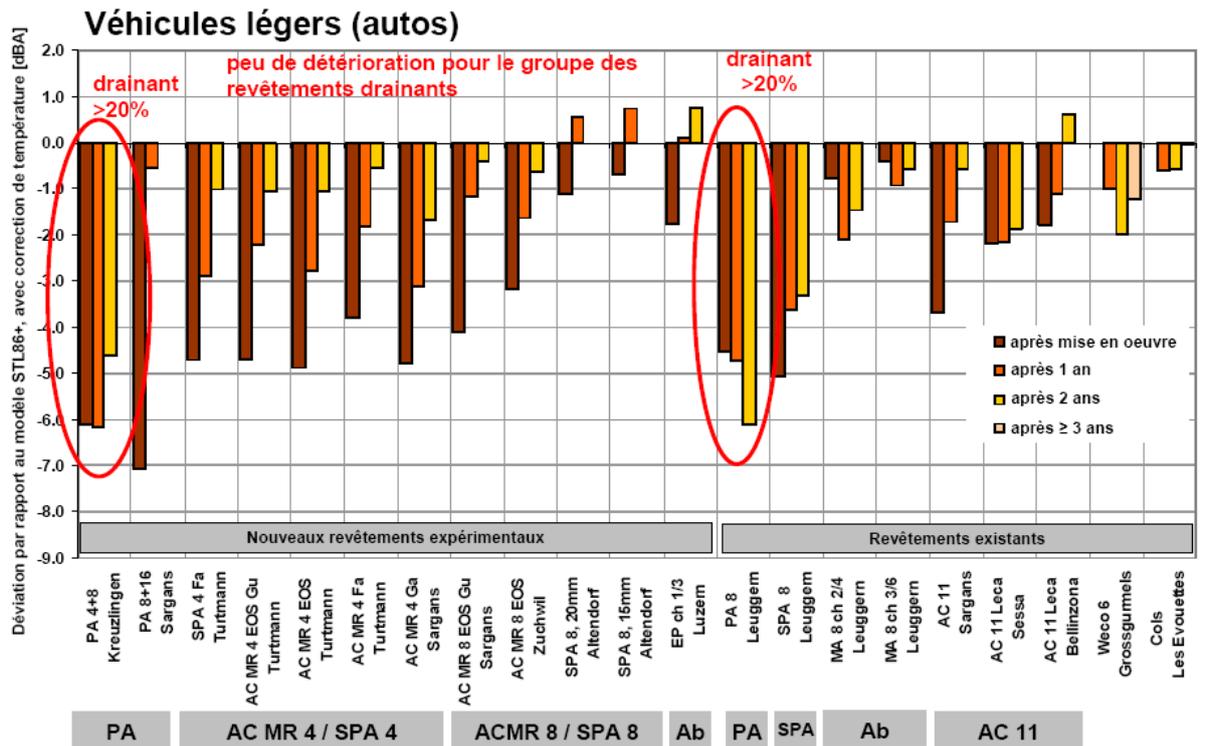


Figure 3.8 : Evolution des qualités acoustiques des revêtements ; focus sur performances des revêtements de chaussée drainants, [2].

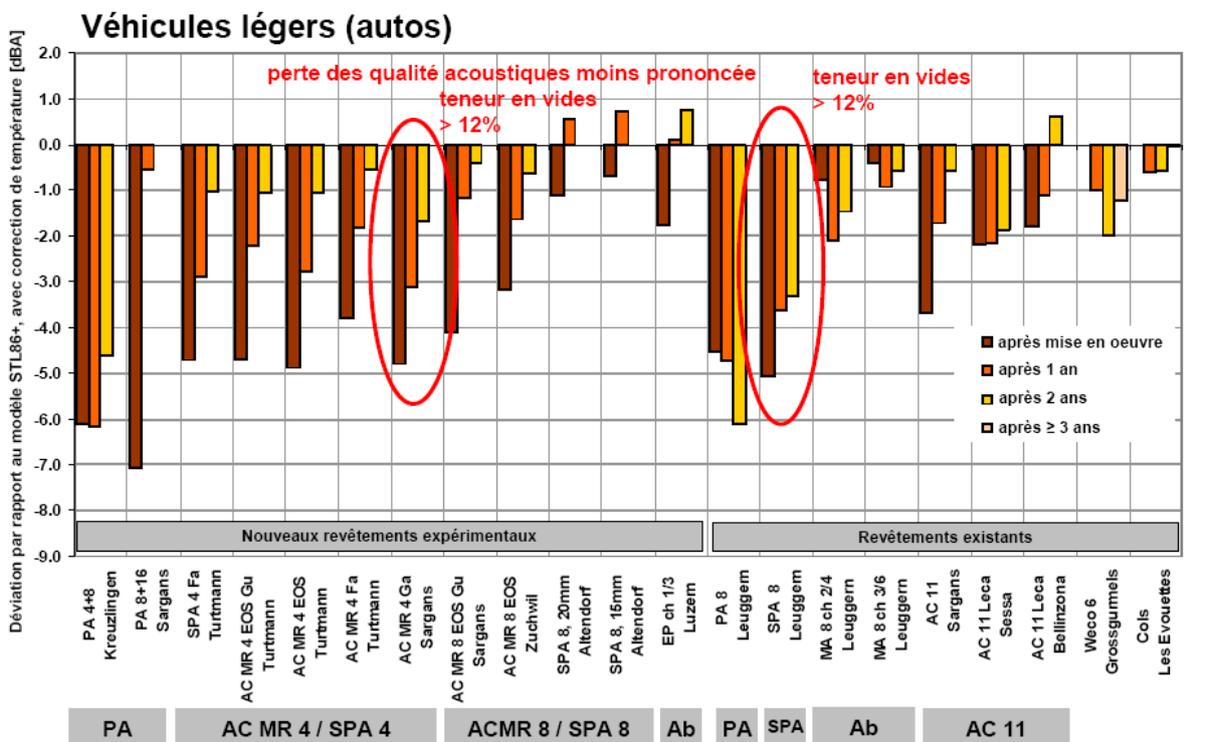


Figure 3.9 : Evolution des qualités acoustiques des revêtements ; focus sur performances des revêtements de chaussée à teneur en vide > 12%, [2].

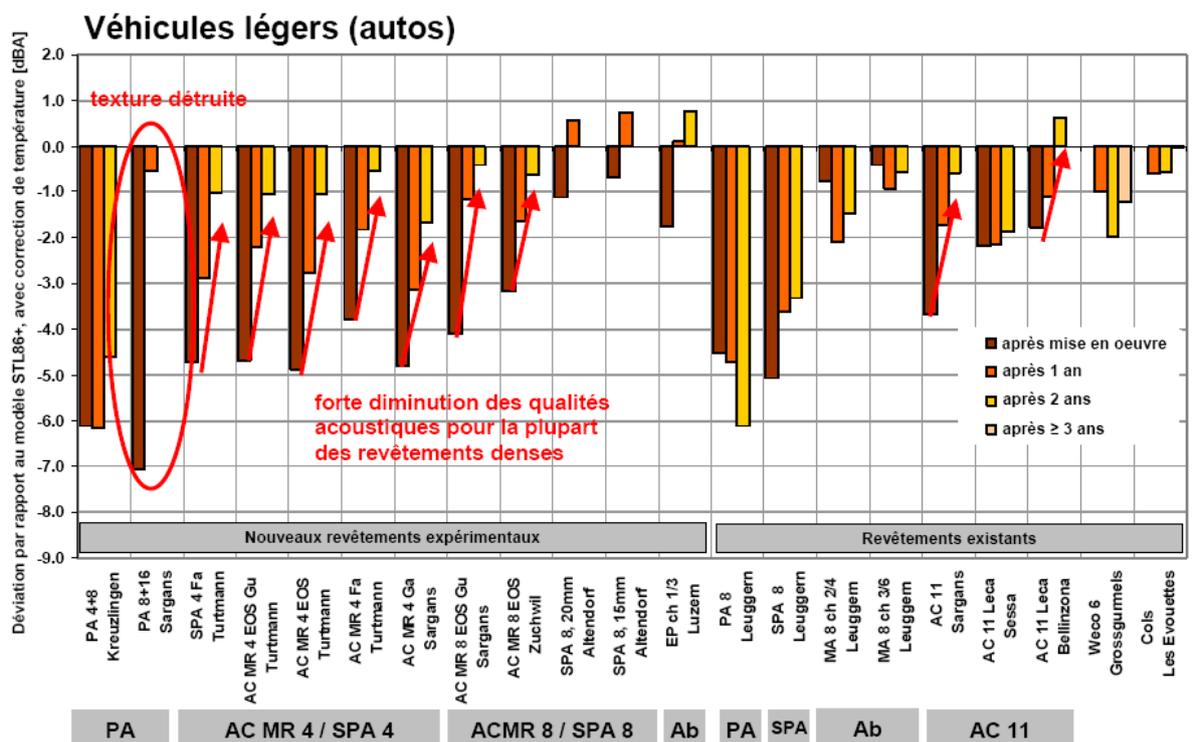


Figure 3.10 : Evolution des qualités acoustiques des revêtements ; focus sur performances des revêtements de chaussée denses, [2].

La cause principale de la dégradation des performances acoustiques réside dans l'altération de la structure de surface, due essentiellement aux contraintes mécaniques et thermiques ainsi qu'à l'encrassement. Ainsi, les résultats au bout de 3 ans indiquent que :

- les enrobés AC MR à granulométrie fine sont particulièrement prometteurs, qu'il s'agisse des considérations acoustiques ou techniques (pose). Il est par conséquent recommandé de choisir des AC MR 4 ou AC MR 8 avec une teneur accrue en vides et de les poser en couche mince sur une couche de liaison stable ;
- les revêtements PA sont très délicats à poser, ils sont plus chers que les enrobés dense ou semi-denses, sensibles aux contraintes mécaniques et requièrent un entretien particulier. Ils peuvent entrer en ligne de compte dans des cas isolés. D'une manière générale cependant, ils ne sont actuellement pas recommandés pour l'utilisation à l'intérieur des localités.

b. Résultats à long terme

Au bout de 6 ans, la baisse des qualités acoustiques constatée est inférieure pour les revêtements existants que celle enregistrée pour les enrobés nouvellement posés (cf. figure 3.6)⁴². En termes de vieillissement, les très bonnes performances acoustiques initiales de l'enrobé bicouche à Kreuzlingen ont très nettement diminué au cours des deux dernières années. On constate un important colmatage des vides, problème non résolu même par un nettoyage intensif au moyen d'un véhicule spécial.

⁴² Résultat essentiellement dû au fait que le trafic est très léger sur certains tronçons, notamment à Leuggern et Sessa.

Les revêtements soumis à des charges de trafic faibles perdent leurs propriétés acoustiques moins rapidement que ceux qui subissent un trafic dense. La densité de la circulation constitue par conséquent un facteur déterminant pour le vieillissement des revêtements.

3.5.2.3. Relation propriétés mécaniques / bruit

Outre l'importance de l'intensité du trafic sur le vieillissement des revêtements de chaussée, l'étude a mis en exergue l'importance de la texture, de la taille des granulats et de la teneur en vides. La figure 3.11 présente les performances acoustiques des revêtements en fonction de la charge de trafic cumulée avec un trafic mixte de 8% de PL.

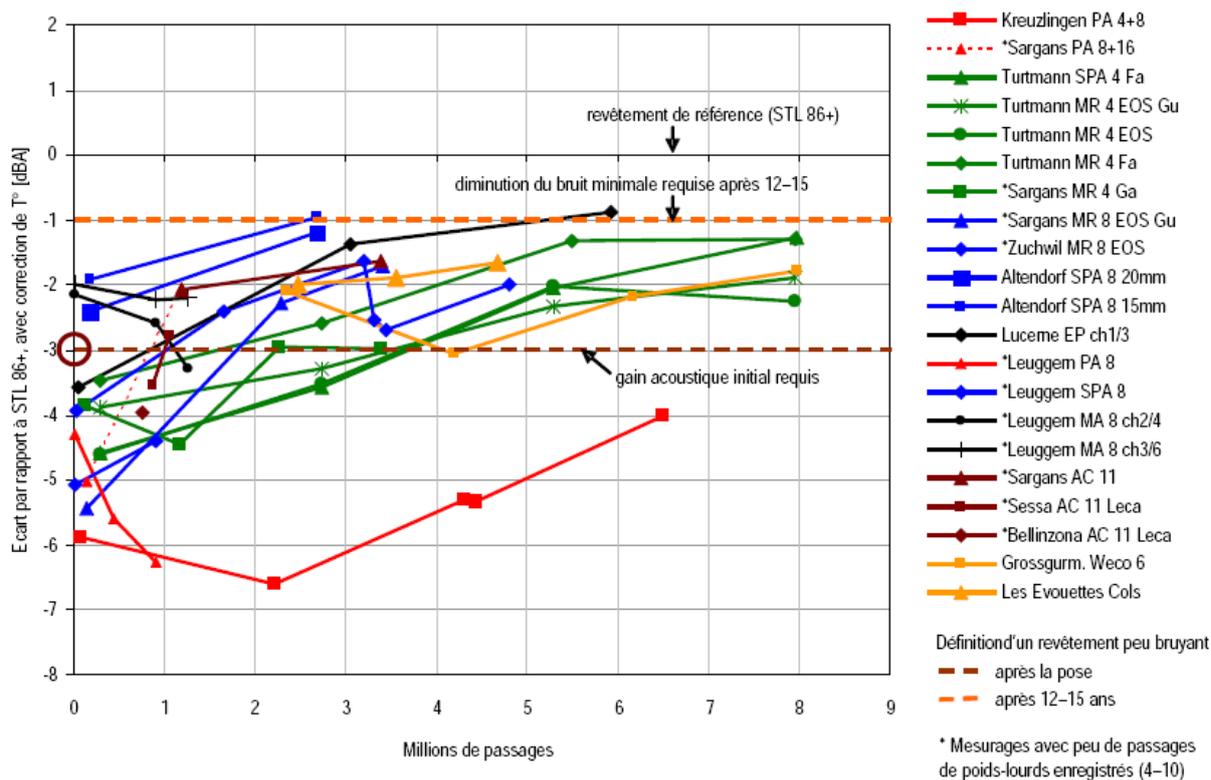


Figure 3.11 : [2] Performances acoustiques des revêtements en fonction de la charge de trafic cumulée avec un trafic mixte de 8% de PL ; nombre de passages de véhicules depuis la mise en œuvre calculée à partir du trafic journalier moyen ; rouge : revêtements drainants ; vert : Revêtements de calibre 4 mm ; bleu : revêtements de calibre 8 mm ; brun : revêtements de calibre 11 mm ; noir : gravillonnages ; orange : revêtements spéciaux.

a. Influence de l'intensité du trafic

Sur des tronçons à faible trafic, les revêtements perdent leurs qualités acoustiques moins vite que sur les routes à forte circulation. La charge de trafic constitue par conséquent un facteur décisif de la durabilité acoustique des revêtements. Les figures 3.12 et 3.13 présentent l'évolution des performances acoustiques en fonction de la charge de trafic.

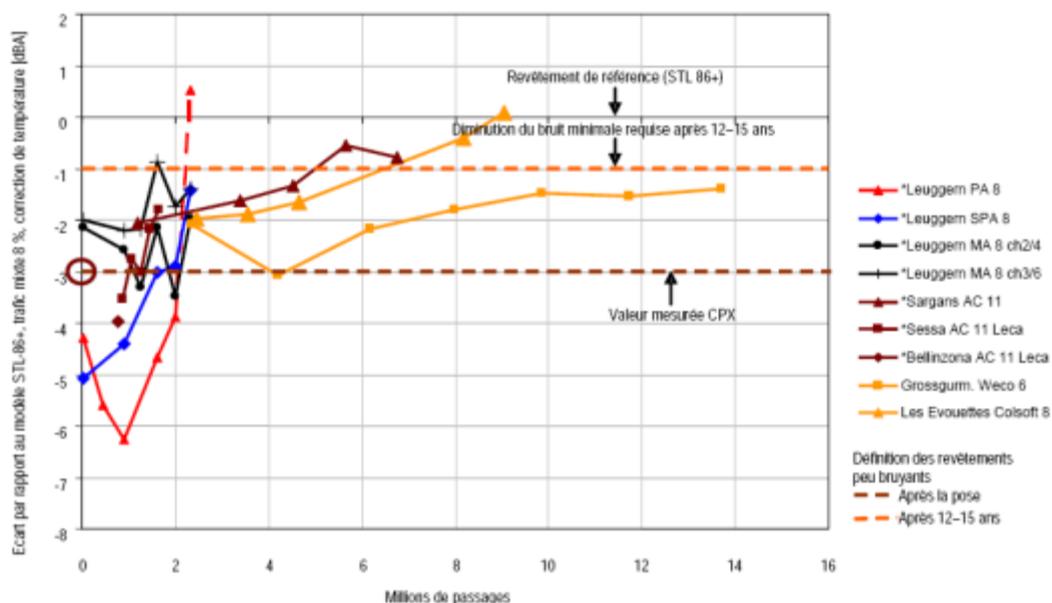


Figure 3.12 : Evolution des performances acoustiques en fonction de la charge de trafic pour les revêtements nouveaux pendant six ans (valeurs méthode CPX). Les graphiques présentent les écarts par rapport au modèle STL-86+ utilisé en Suisse, [2].

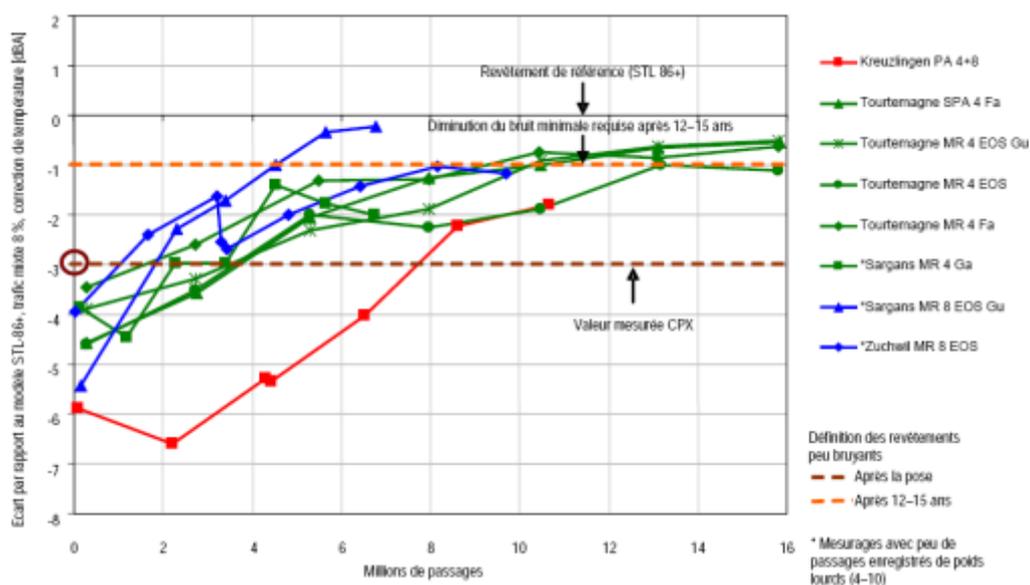


Figure 3.13 : Evolution des performances acoustiques en fonction de la charge de trafic pour les revêtements existants pendant six ans (valeurs méthode CPX), [2].

b. Influence de la profondeur de texture

Une relation entre la profondeur de texture (ici la valeur MPD : "*Mean Profile Depth*") et les propriétés acoustiques a été constatée pour les revêtements AC MR et SPA. Une réduction de la profondeur moyenne de texture entraîne directement une augmentation des émissions de bruit. Une diminution de la profondeur de texture peut être la conséquence d'un encrassement ou d'une modification irréversible de la structure de la surface, due aux diverses contraintes. Ces changements sont très probablement causés par la sollicitation du revêtement par le trafic lorsque les températures sont élevées.

c. Influence de la taille de granulats

Les revêtements expérimentaux d'une granulométrie maximale de 4 mm ont un comportement acoustique plus favorable que les enrobés plus grossiers. En effet, il a été constaté que les revêtements pilotes de granulométrie fine (calibre de 4 mm) ont tendance à présenter une meilleure homogénéité acoustique que ceux de granulométrie plus élevée. Les plus forts écarts d'homogénéité, avec des variations de niveaux supérieurs à 2 dB(A), ont été enregistrés pour un calibre de granulats maximal de 11 mm (AC11 Sargans et AC11 Leca Bellinzone).

d. Influence de la teneur en vides

Des expériences positives ont été faites sur les tronçons pilotes avec des enrobés contenant un volume de vide de 8 à 16 %. Ces types de revêtements sont qualifiés de "semi-denses". Lors du choix du revêtement, un compromis doit être trouvé entre des propriétés acoustiques optimales (teneur en vides élevée) et une durée d'utilisation élevée (faible teneur en vides). Ces tendances opposées sont représentées schématiquement dans la figure 3.1. La teneur en vides à viser doit se situer dans le "domaine optimal".

3.5.2.4. Conclusions de l'étude

En ce qui concerne les nouveaux revêtements de chaussée "pilote" :

- dans le cas des revêtements semi-denses, le vieillissement acoustique évolue de manière asymptotique, c'est-à-dire que la détérioration ralentit avec le temps ;
- les enrobés de granulométrie fine (4 mm) ont tendance à mieux conserver leurs qualités acoustiques que ceux aux granulats plus grossiers (8 mm).

Pour les revêtements existants, la majorité se trouve sur des tronçons à faible circulation. Il est de ce fait impossible d'émettre un avis sur leur vieillissement acoustique. Parmi les revêtements pour lesquels la circulation est intense (Weco 6 de Grossgurmels), son comportement au vieillissement correspond à celui des revêtements nouveaux avec granulats de calibre 4 mm.

3.5.3. Communauté Urbaine de Lille Métropole

La communauté urbaine de Lille Métropole a mené une campagne de mesure des performances acoustique d'un revêtement de chaussée "silencieux" de type BBME 0/10 sur le territoire de la commune de Marcq-en-Barœul en 2008 (rue de la Reine Astrid) [14]. En complément les caractéristiques physiques du revêtement ont également été mesurées (densité, taux de compacité, taux de vides, profondeur de macrotexture).

Sur ce tronçon, le trafic routier est constitué de 3800 véhicules/jour dont 0,2% de PL, 50 km/h de vitesse réglementaire, 42 km/h de vitesse moyenne et 12% d'infractions à la vitesse.

Les mesures en continu sur 24h ont été effectuées à proximité des habitations riveraines avant et après la pose du revêtement, soit respectivement les 30 septembre 2008 et 21 octobre 2008. Le tableau 3.7 synthétise les résultats de l'étude.

	Tableau de synthèse (valeurs en dB(A))	Avant	Après	Ecart
Période de 24 h	Niveau moyen	62.7	60.5	-2.2
	Niveau minimum	30.6	32.6	1.9
	Niveau maximum	79.3	79.3	0.0
Période diurne (6h-22h)	Niveau moyen	64.4	62.0	-2.4
	Niveau minimum	37.8	34.1	-3.7
	Niveau maximum	79.3	79.3	0.0
Période nocturne (22h-6h)	Niveau moyen	54.1	52.5	-1.6
	Niveau minimum	30.6	32.6	1.9
	Niveau maximum	77.7	72.7	-4.9

Tableau 3.7 : Performances acoustiques avant et après le revêtement de chaussée "silencieux".

La pose du revêtement de chaussée "silencieux" a sensiblement amélioré les performances acoustiques de l'infrastructure. A trafic et vitesse équivalents, on observe une diminution du niveau sonore de 2,4 dB(A) en période diurne et de 1,6 en période nocturne. L'écart est moins élevé la nuit en raison du passage de véhicules entre 3h et 5h, uniquement après la pose de l'enrobé. Ce résultat est d'autant plus intéressant, qu'il correspond à une section où la vitesse est limitée à 50 km/h. Toutefois, il serait intéressant de suivre conjointement au fil des années l'évolution des performances acoustiques du revêtement et l'altération de ses propriétés physiques.

3.5.4. Expérience du Conseil Général des Hauts-de-Seine (CG92)

Ce chapitre présente une étude réalisée par le Conseil Général des Hauts-de-Seine (CG92) [47]. Dans le cadre de sa politique en faveur de la lutte contre les nuisances sonores, le CG92 a installé des revêtements de chaussées silencieux qui ont pour effet de diminuer le bruit de contact pneumatique / chaussée. Depuis 1997 et à l'initiative du CG92, des mesures sont effectuées régulièrement afin de caractériser les différentes efficacités obtenues et de suivre dans le temps ce type de revêtements. Ainsi, l'étude présente le bilan établi par la DIT/DEGD⁴³ du CG92 des revêtements de chaussées silencieux mis en œuvre sur les routes départementales des Hauts-de-Seine.

Ces données présentent un caractère exceptionnel, aussi bien en termes de surface du territoire documenté qu'en termes de témoignage d'expérience, puisqu'elles retracent le suivi des performances acoustiques de près d'une centaine de tronçons de revêtements de chaussées silencieux depuis presque de 15 ans.

⁴³ DIT/DEGD : Direction des Infrastructures de Transport / Division Etudes Générales de Déplacements.

Nous présentons dans ce chapitre une synthèse des résultats de l'ensemble des mesures de caractérisation acoustique réalisées à ce jour à la demande de la Direction des Infrastructures de Transports (DIT) du CG92.

3.5.4.1. Contexte

Près d'une centaine de tronçons de routes départementales des Hauts-de-Seine a été évalué périodiquement. Selon les tronçons, des mesures ont été réalisées avant travaux (revêtement de chaussée initial) et après travaux (revêtement de chaussée à l'état jeune), puis quelques années après la pose (suivi de l'enrobé dans le temps). Le bilan de la base de données du CG92 porte à la fois sur des analyses par type de revêtement de chaussée et par tronçon documenté et sur la pérennité des revêtements de chaussées silencieux mis en œuvre. La base de données est régulièrement renseignée par la DIT à partir de mesures réalisées par le Laboratoire Régional de l'Est Parisien de 1997 à 2000 et le bureau d'études "Equipement et Environnement" depuis 2000. L'analyse porte sur deux types de mesures :

- des mesures en champ proche selon la méthode "CPX" (cf. figure 3.14 et §2.4.1.2 et), réalisées à proximité de la chaussée à l'aide d'un véhicule embarqué équipé d'un système d'acquisition acoustique et d'un tachymètre, qui enregistrent respectivement et simultanément les signaux de pression acoustique et de vitesse, permettant *in fine* de caractériser le bruit de contact pneumatique / chaussée. On rappelle ici que la valeur de $B50_{(1m)}$ est l'indice principal retenu pour caractériser acoustiquement un revêtement de chaussée selon la méthode CPX de mesure en champ proche. Il représente le niveau sonore mesuré en dB(A) à la vitesse de référence de 50 km/h ;
- des mesures acoustiques en champ éloigné (points fixes réalisés selon la norme NFS 31-085⁴⁴) réalisées en façades des habitations à l'aide d'un sonomètre, enregistrant les niveaux sonores sur les périodes 6h-22h et 22h-6h, permettant de déterminer l'efficacité perçue chez les riverains sur ces périodes (cf. figure 3.15). Des comptages automatiques de trafic permettent un calage des résultats acoustiques avec les conditions de trafic routier (norme NFS 31-085).



Figure 3.14 : Mesure du bruit de roulement en continu, [47].



Figure 3.15 : Mesure en façade des habitations riveraines, [47].

⁴⁴ NFS 31-085 : Caractérisation et mesurage du bruit dû au trafic routier.

3.5.4.2. Résultats par type de revêtement de chaussée

Les principaux enrobés étudiés sont de type béton bitumineux semi- grenu (BBSG) pour la plupart des revêtements initiaux et de type BBTM 0/10 ou BBTM 0/6 pour les nouveaux revêtements. Pour un grand nombre de revêtements initiaux, l'information concernant le type de revêtement n'est pas toujours disponible. Il doit s'agir très certainement de BBSG, et les mesures correspondantes ont été analysées séparément sous l'intitulé "BBSG ?". On notera également la présence de trois autres types de revêtements (ECF, BBM et BBDr 0/10) dans la base de données. Le tableau 3.8 présente les résultats des mesures acoustiques en champ proche par type de revêtement, en distinguant les revêtements de chaussées initiaux et les nouveaux revêtements au jeune âge. La figure 3.16 propose une illustration graphique des résultats.

Anciens revêtements (mesurés avant remplacement du revêtement de chaussée)	Nouveaux revêtements (mesurés après la pose)
BBSG : 86,4 dB(A) BBDr 0/10 : 83,4 dB(A) BBM : 84,0 dB(A)	BBTM 0/10 : 83,8 dB(A) BBTM 0/6 : 80,7 dB(A) ECF ⁴⁵ : 86,4 dB(A) BBM : 82,5 dB(A)

Tableau 3.8 : Valeurs moyennes de $B50_{(1m)}$ avant et après la pose des nouveaux revêtements de chaussées, [47].

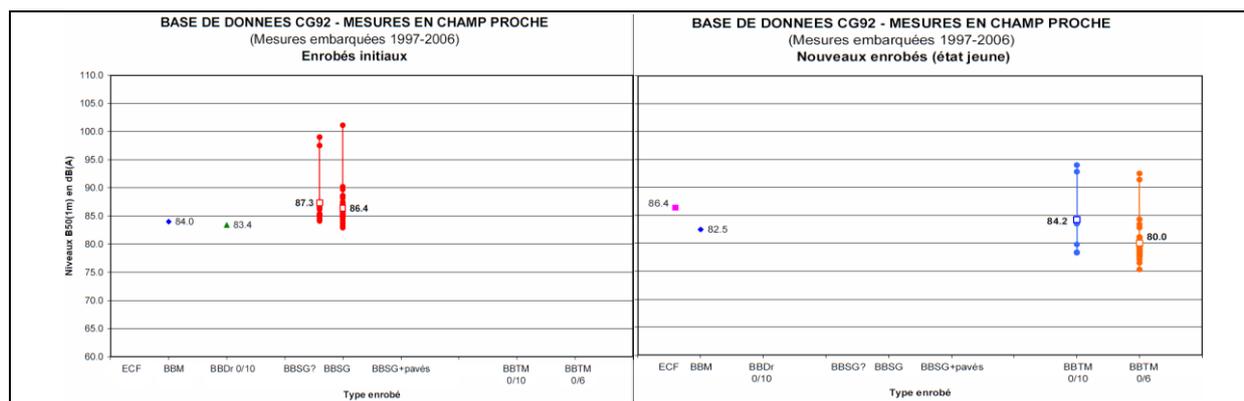


Figure 3.16 : Performances acoustiques avant et après la pose des nouveaux revêtements de chaussées (méthode CPX, valeurs moyennes de $B50_{(1m)}$), [47].

⁴⁵ ECF : Enrobé coulé à froid.

Le tableau 3.9 présente les résultats des mesures acoustiques en champ proche des revêtements de type BBTM 0/10 et BBTM 0/6 au jeune âge (après la pose), pour 3 périodes différentes. La figure 3.17 propose une illustration graphique des résultats.

	Période 1998 - 2000	Période 2001 - 2002	Période 2003 - 2004	Période 2005
BBTM 0/6	82,1 dB(A)	78,2 dB(A)	79,4 dB(A)	78,2 dB(A)
BBTM 0/10	83,8 dB(A)	78,8 dB(A)	-	-

Tableau 3.9 : Evolution des performances acoustiques pour des revêtements de chaussée de type BBTM 0/6 et BBTM 0/10 au jeune âge (méthode CPX, valeurs moyennes de $B_{50(1m)}$ après pose), [47].

BASE DE DONNEES CG92 - MESURES EN CHAMP PROCHE

(Mesures embarquées 1997-2006)

Analyse par période de pose et par type d'enrobé

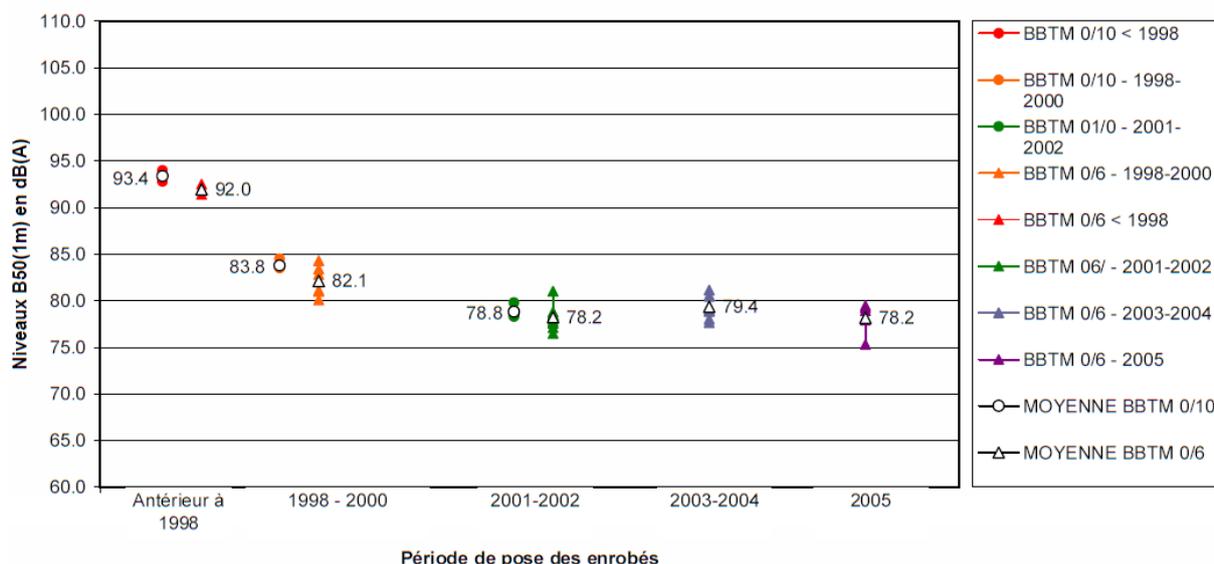


Figure 3.17 : Evolution des performances acoustiques pour des revêtements de chaussée de type BBTM 0/6 et BBTM 0/10 au jeune âge (méthode CPX, valeurs moyennes de $B_{50(1m)}$ après pose), [47].

L'amélioration des performances acoustiques des revêtements de chaussée au jeune âge est clairement mise en évidence. Ainsi à partir de 2001, on constate une réduction des performances acoustiques de l'ordre de 5 dB (A) pour les BBTM 0/10 et 4 dB(A) pour les BBTM 0/6. Ces gains significatifs sont attribuables aux efforts technologiques mis en œuvre à la fin des années 1990 par les concepteurs de revêtements de chaussées.

A partir de 2001, on observe une relative stagnation de l'évolution des performances acoustiques des revêtements de chaussée de type BBTM 0/10 et BBTM 0/6. En effet, les valeurs moyennes mesurées en champ proche restent comprises entre 78,2 et 79,4 dB(A). On distingue toutefois sur une mesure réalisée en 2005, une valeur remarquablement faible ($B_{50(1m)}=75,3$ dB(A)) attribuée à une nouvelle technologie de revêtement.

3.5.4.3. Résultats globaux pour l'ensemble de tronçons étudiés

L'analyse des résultats porte sur 75 tronçons de routes départementales des Hauts-de-Seine. Cette approche globale sur l'ensemble du territoire départemental permet de quantifier la réduction du bruit attribuable à la politique du Conseil Général de renouvellement des revêtements de chaussée par des produits aux performances acoustiques élevées.

Ainsi, la réduction moyenne des niveaux sonores observée en champ proche suite à la pose d'un revêtement de chaussée silencieux est de **5,6 dB(A)**. Ce gain considérable correspond à la diminution de la composante "bruit de roulement". En façade des habitations riveraines des tronçons routiers étudiés, les performances acoustiques des revêtements de chaussée sont analysées sur des niveaux corrigés à partir d'un trafic équivalent, ceci afin de pouvoir comparer les situations à niveaux de trafic semblables (norme NFS 31-085). Ainsi, les gains moyens observés en façade suite à la pose d'un revêtement de chaussée silencieux sont de :

- **2,1 dB(A) pour la période de jour (6h-22h),**
- **3,1 dB(A) pour la période de nuit (22h-6h).**

Ces gains significatifs correspondent à la diminution des niveaux sonores perçue chez les riverains sur chaque période ; ils sont moins importants qu'en champ proche du fait de la prise en compte d'autres sources de bruit, en particulier le bruit de moteur des véhicules.

3.5.4.4. Pérennité des revêtements de chaussée silencieux

Il est intéressant d'exploiter cette base de données afin d'étudier la pérennité des performances acoustiques des revêtements de chaussées silencieux. Si au jeune âge les performances acoustiques sont remarquables, quand est-il après plusieurs années d'exploitation ? L'analyse proposée par la DIT/DEGD du CG 92 apporte des réponses concrètes à ces interrogations. Sur l'ensemble de la base de données, environ un tiers des tronçons étudiés ont pu être exploités pour mener cette analyse sur des BBTM pour lesquels des mesures périodiques ont été réalisées. La figure 3.18 présente l'évolution des niveaux mesurés en champ proche en fonction de l'âge du revêtement.

BASE DE DONNEES CG92 - MESURES EN CHAMP PROCHE (Mesures embarquées 1997-2006) Pérennité des enrobés BBTM

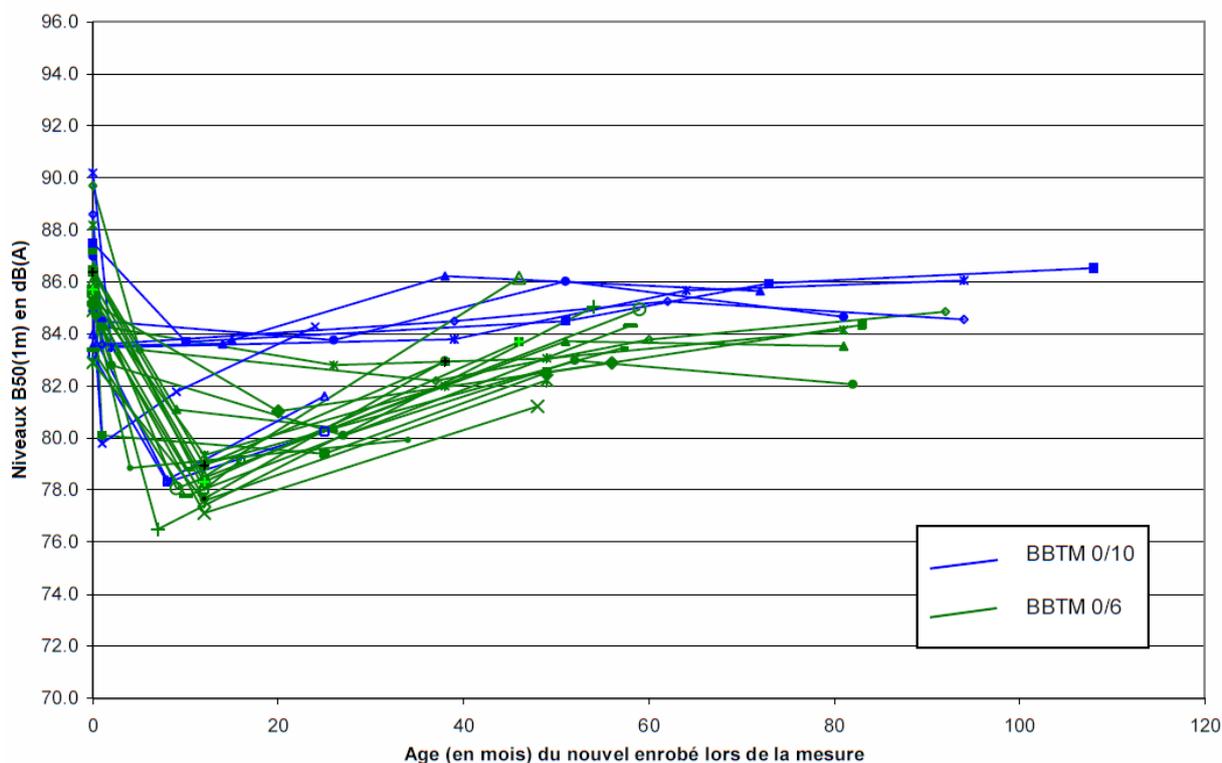


Figure 3.18 : Evolution des niveaux mesurés en champ proche en fonction de l'âge des revêtement de type BBTM ; méthode CPX, valeurs de $B_{50(1m)}$, [47].

D'une manière générale, on observe une baisse importante des niveaux sonores suite au renouvellement du revêtement de chaussée, avec une efficacité plus importante pour les revêtements de type BBTM 0/6. Par la suite, on constate que les niveaux évoluent différemment selon le type de BBTM. Il semble que les performances acoustiques des revêtements de chaussée de type BBTM 0/10 soient plus constantes dans le temps que celles des BBTM 0/6. L'efficacité acoustique des BBTM 0/6 semble se dégrader plus rapidement. On constate toutefois, que même si les performances acoustiques de deux types de produits tendent à se rapprocher au fil des années d'exploitation, les BBTM 0/6 restent globalement plus performants que les BBTM 0/10. Le tableau 3.10 illustre ces propos.

	après 30 à 40 mois	après 70 à 80 mois
BBTM 0/6	82 dB(A)	84 dB(A)
BBTM 0/10	84 dB(A)	86 dB(A)

Tableau 3.9 : Evolution temporelle des performances acoustiques pour des revêtements de chaussée de type BBTM 0/06 et BBTM 0/10 (méthode CPX, valeurs moyennes de $B_{50(1m)}$), [47].

Au bout de 70 à 80 mois, il apparait donc que les revêtements de chaussée de type BBTM 0/10 soient revenus à des niveaux sonores identiques aux revêtements initiaux (BBSG). Les revêtements de type BBTM 0/6 semblent conserver quant à eux encore une partie de leur efficacité acoustique. Cette tendance est cependant à relativiser compte tenu du faible échantillon d'échantillons de BBTM 0/10

disponibles pour l'analyse au sein de la base de données. Des mesures supplémentaires s'avèrent nécessaires afin d'infirmer ou confirmer cette tendance.

3.5.5. Synthèse

Les éléments apportés par les 4 retours d'expériences présentés dans ce rapport s'appuient sur des objectifs différents et des protocoles de mesure différents (durées des études, méthodes de mesures, types de revêtement, conditions de trafic, etc.). Cette diversité apporte des éléments complémentaires mais également certains points de convergence. Ces aspects sont intéressants à étudier afin d'établir un bilan synthétique des témoignages récoltés. Les différents enseignements à tirer de ces analyses sont présentés ci-après.

3.5.5.1. Efficacité des revêtements de chaussées silencieux dès 50 km/h

Les résultats de mesures confirment que dès 50 km/h les atténuations sonores apportées par revêtements de chaussée silencieux sont significatives. Ce constat confirme l'efficacité potentielle de ce type de solution en milieu urbain. Pour les 4 études exploitées, autour de 50 km/h on observe une réduction du niveau sonore significative :

- 2 à 5 dB(A) dans le cadre du projet Européen SILVIA (mesures au passage),
- 3 à 6 dB(A) dans le cadre de l'étude suisse (modèle STL86+),
- 2 à 3 dB(A) dans le cadre de l'étude de la Communauté Urbaine de Lille Métropole (mesures à proximité des habitations),
- 5 à 6 dB(A) en champ proche et 2 à 3 dB(A) à proximité des habitations riveraines pour l'étude du Conseil Général des Hauts-de-Seine.

3.4.5.2. Influence de l'intensité du trafic

Cet aspect est traité dans programme de recherche suisse "Revêtements de routes peu bruyants à l'intérieur des localités". Sur des tronçons à faible trafic, les revêtements perdent leurs qualités acoustiques moins vite que sur les routes à forte circulation. La charge de trafic constitue par conséquent un facteur décisif de la durabilité acoustique des revêtements.

3.5.5.3. Influence de la taille des granulats

La taille des granulats s'avère un facteur influant d'amélioration des performances acoustiques des revêtements de chaussée. Les revêtements expérimentaux de faible granulométrie ont un comportement acoustique plus favorable que les enrobés plus grossiers. Cet aspect est confirmé dans les études proposées par :

- l'ORFOU et l'OFEV en Suisse (étude spécifique des revêtements de granulométrie 0/4 par rapport aux autres types de revêtements),
- le CG92 en France (comparaison des performances de revêtement de chaussées de type BBTM 0/6 et BBTM 0/10, différence moyenne de l'ordre de 3 dB(A) au jeune âge en faveur du BBTM 0/6 pour une mesure en champ proche).

Ces résultats confirment les observations formulées au §2.4.2.1 pour la base de données du SETRA. On constate bien que pour une même famille de produit, l'influence du calibre du granulat (D) de l'enrobé est bien déterminante, ainsi plus le D est petit, plus le bruit généré est faible.

3.5.5.4. Influence de la teneur en vides

Un volume de vides élevé s'avère un facteur influant d'amélioration des performances acoustiques des revêtements de chaussée. Toutefois l'expérience suisse recommande lors du choix d'un revêtement de chaussée dans le cadre d'une exploitation en milieu urbain, un compromis entre des propriétés acoustiques optimales (teneur en vides élevée) et une durée d'utilisation élevée (faible teneur en vides). Le compromis proposé repose sur un type de revêtement "semi-dense" caractérisé par un volume de vides de 8 à 16 %.

Ces résultats confirment les observations formulées au §2.4.2.1 pour la base de données du SETRA. On constate bien que plus le revêtement est ouvert ou drainant, meilleure est l'absorption et plus le bruit est réduit.

3.5.5.5. Vieillessement des performances acoustiques

Le projet européen SILVIA exploite principalement des données de mesures de revêtement de chaussée silencieux relativement jeune (âge moyen d'environ 2 ans pour les revêtements de type SMA, BBDr monocouche, BBDr bicouche et BBTM). Les témoignages concernant le vieillissement des performances acoustiques proviennent des expériences menées en Suisse sur une période de 7 ans et en France dans le département des Hauts-de-Seine sur une période de 15 ans. Ces deux expériences mettent en évidence une baisse régulière des qualités acoustiques de revêtements de chaussées étudiés au cours du temps. Deux à trois périodes d'évolution semblent se dégager :

- période de 0 à 2 ans environ, on constate une faible dégradation des niveaux de bruit dans le cas des revêtements testés en Suisse, et même une amélioration conséquente des performances acoustique au cours de la première année pour les revêtement de chaussée de type BBTM étudiés sur le territoire altoiséquanais,
- période de 2 à 10, on constate une dégradation régulière des performances acoustique, qui tend à vers un comportement asymptotique après 4 ans en ce qui concerne l'expérience menée dans les Hauts-de-Seine (particulièrement pour le BBTM 0/6).

Au bout de 10 ans, les performances acoustiques semblent se stabiliser et sont alors parfois équivalentes à celles des revêtements de chaussées usuels (BBSG par exemple). Il est important de noter que le modèle de vieillissement proposé dans le guide du SETRA (cf. §2.5.2) correspond bien à l'évolution temporelle observée sur ces deux témoignages, ce qui laisse présager d'une pérennité des revêtements acoustiques de l'ordre de 10 ans.

3.5.5.6. Performances en façade des habitations

Dans les retours d'expériences exploitées, l'évaluation des performances acoustiques des revêtements de chaussée silencieux sont majoritairement effectuées en champ proche ou à 7,50 m de l'axe de la bande de roulement à caractériser. Les réductions sonores mesurées restent-elles valables au niveau des façades des habitations riveraines de ces infrastructures ? Les études menées en France à Marcq-en-Barœul et sur le territoire du département des Hauts-de-Seine, confirment une réduction significative du bruit en façade des habitations suite à la pose d'un revêtement de chaussée silencieux : de l'ordre de 2 à 3 dB(A). Rappelons que cette solution offre une réduction du bruit à la source, c'est-à-dire que la réduction du bruit est profitable à l'ensemble de la population riveraine. Elle ne se limite pas à une partie des riverains, par exemple : aux habitants des étages inférieurs d'un immeuble dans le cas d'un écran acoustique.

3.6. Attentes des collectivités territoriales

Les différentes discussions entretenues avec les responsables des collectivités territoriales en charge de la gestion des infrastructures de transport dans le cadre de la préparation de ce document, nous ont permis d'identifier leurs principales attentes sur le sujet des revêtement de chaussées silencieux.

Parmi ces attentes figure une meilleure visibilité sur les performances et le coût des produits sur le long terme, éléments indispensables à la mise en œuvre une politique budgétaire et environnementale cohérente dans ce domaine. La pérennité des produits proposés actuellement sur le marché ne semble pas dépasser une dizaine d'année. Compte tenu de la densité du réseau routier francilien et des enjeux budgétaires associés, les attentes des collectivités territoriales d'Ile-de-France correspondent davantage à des pérennités d'au moins 20 ans.

Ainsi, le produit "idéal" semble plutôt correspondre à un revêtement "relativement" performant en termes de bruit de roulement et possédant d'excellentes performances en termes de conservation des performances acoustiques sur la durée. Cet objectif semble à l'heure actuelle illusoire pour les concepteurs de revêtements de chaussées. Le maintien des performances acoustiques sur la durée passe inéluctablement par un entretien régulier, nécessitant un renouvellement périodique de la couche superficielle. Cette couche peut être relativement mince dans le cas des revêtements de chaussée de type BBTM.

Des pistes de réflexion restent toutefois ouvertes pour répondre à ce manque d'information sur le long terme, pourquoi ne pas envisager par exemple une caractérisation normative en laboratoire d'un vieillissement accéléré ? Concernant les aspects budgétaires, la forte variabilité du coût au m² dû à des situations et des besoins hétéroclites⁴⁶ ne permet pas de communiquer à l'heure actuelle des données précises aux décideurs locaux. Idéalement, la constitution d'une base de données complétant les données acoustiques par des données financières et davantage de données descriptives (condition de pose, intensité du trafic, conditions météorologiques, opérations de maintenance, etc.), permettrait de mieux documenter l'ensemble des enjeux concernant les collectivités territoriales. La mise en œuvre d'un tel projet s'avère ambitieux et nécessiterait de ce fait un partenariat avec les différents acteurs : les services techniques de l'Etat, les observatoires du bruit, les gestionnaires des voiries, les départements, les associations concernées par cette problématique, etc...

Cette approche permettrait d'apporter une meilleure visibilité à long terme aux collectivités territoriales en termes d'investissement et d'amélioration de l'environnement sonore des riverains des infrastructures routières. A terme, l'analyse statistique des données recueillies dans la base de données permettrait également de mieux comprendre les paramètres influant sur le vieillissement des revêtements de chaussées silencieux.

⁴⁶ 35 à 75 euros le m² suivant le type de revêtement, la couche d'accrochage, les purges nécessaires, la qualité de la structure sous le revêtement, les conditions de pose (arrachement si mal posé) en ce qui concerne l'expérience du DIT/DEGD (CG92).

Conclusion

Ce document permet d'apporter un certain nombre de réponses aux interrogations des responsables des collectivités territoriales en charge des transports et de l'environnement sur le recours à des revêtements de chaussées silencieux, tout particulièrement sur l'efficacité de ces solutions en termes de performances acoustiques en milieu urbain dès 50 km/h. Ces types de revêtement de chaussée nécessitent une mise en œuvre et des opérations de maintenance plus coûteuses que les revêtements de chaussées classiques. Leur durée de vie est également plus réduite. L'ensemble de ces éléments doivent être pris en compte dans le choix d'un revêtement de chaussée particulier.

Les points d'éclairage concernant le chiffrage du surcoût potentiel, l'estimation de la durée de vie, la résistance aux conditions climatiques, les difficultés éventuelles de mise en œuvre, la maintenance... sont essentiellement documentés par des retours d'expériences. A l'heure actuelle, les concepteurs de revêtements de chaussées ne disposent pas de suffisamment de recul pour communiquer des données précises pour la nouvelle génération d'enrobés silencieux. Pour autant, les formulations de ces nouveaux produits ayant été développées à partir de l'expérience acquise avec les matériaux de génération précédente comme les BBTM, la durabilité des enrobés silencieux de dernière génération n'est ainsi pas totalement inconnue.

A ce stade de l'étude, les retours recensés sont trop peu nombreux pour dégager des éléments de réponses précis. Un travail de constitution d'une base documentaire sur ce sujet serait à notre sens intéressant. Dans ce sens et afin de fournir une information complète et de qualité sur les revêtements de chaussées acoustiques, la mise en œuvre d'études mutualisées intégrant les collectivités territoriales, les laboratoires et centres techniques régionaux ou observatoires du bruit semble particulièrement pertinente.

Le recours à des revêtements de chaussées silencieux présente un surcoût par rapport aux solutions classiques, néanmoins sur des zones sensibles en termes de nuisances sonores dues au trafic routier, cette solution s'avère :

- plus économique qu'une couverture de l'infrastructure routière ou que la mise en place d'un écran acoustique,
- moins sensible à mettre en œuvre qu'une réduction imposée de la vitesse de circulation autorisée.

En outre, elle offre une réduction du bruit à la source, c'est-à-dire que la réduction du bruit est profitable à l'ensemble de la population riveraine. Elle ne se limite pas à une partie des riverains, par exemple : aux habitants des étages inférieurs d'un immeuble dans le cas d'un écran acoustique.

Documents de référence

- [1] European project SILVIA (Sustainable Road Surfaces for Traffic Noise Control), "Guidance Manual for the Implementation of Low-Noise Road Surfaces", "Integration of Low-Noise Pavements with other Noise Abatement Measures", "Safety Aspects Related to Low Noise Road Surfaces", "Traffic Management and Noise Reducing Pavements", FEHRL, 2006.
- [2] "Revêtements de routes peu bruyants à l'intérieur des localités", OFROU/OFEV, rapports de synthèse 2003, 2007 & rapport annuel 2009.
- [3] Goubert L, "Vadémécum du bruit routier urbain - Fiche 7 technique - Les revêtements routiers", IBGE, www.ibgebim.be.
- [4] "Note de sensibilisation n°5 : Diffusion de la base de données bruit de roulement", Groupe National des Caractéristiques de Chaussée, IDRRIM, mai 2011.
- [5] Nouveau guide d'émission du bruit 2008, "Prévision du bruit routier, Partie 1 : Calcul des émissions sonores dues au trafic routier", SETRA, juin 2009.
- [6] Sandberg U., Ejsmont J.A., "Tyre/road reference book", INFORMEX, Kisa, Suède (2002).
- [7] Goubert L, "The use of Low Noise Pavement in urban areas", Belgian Road Research Centre, Belgique (2008).
- [8] IPG, "Inventory study of basic knowledge on tyre/road noise", Dutch Innovation Programme on noise mitigation, DWW-2005-022 (2005).
- [9] M+P consulting engineers, "Guidelines for silent roads in NL", Dutch Road Research Laboratories, Netherlands Irf (2010).
- [10] Gourier O, « Etude du Stone Mastic Asphalt en comparaison avec les enrobés français », Mémoire thesis, INSA de Strasbourg (2009).
- [11] Larsen L E, Bendtsen H, « Costs and perceived noise reduction of porous asphalt pavements », Proceedings Internoise, La Haye (2001).
- [12] Larsen L E, Bendtsen H, « Noise reduction with porous asphalt – Costs and perceived effect », Ninth International Conference on Asphalt Pavements, Copenhagen (2002).
- [13] European project Silence, "Low noise urban road surfaces", Guy Descornet, BRRC (2008).
- [14] "Enquête acoustique : Mesure des performances acoustiques d'un enrobé phonique - Marcq en Baroeul", CA Lille Métropole (2008).
- [15] Clapp T.G., Correlation of pavement texture to tyre noise and skid resistance, North Carolina State University, School of Engineering (1985) ; Eberhardt A.C., Investigation of the tyre/pavement interaction. Mechanism Phase I and II – Final Report, Dept. Of Mechanical & Aerospace Engineering, DOT/OST/P-34/86-036 (1985) ; Noda E. e.a., First Experience of noise-reducing exposed small aggregate concrete surfaces in Japan, 8^e Symposium international des routes en béton, Lisbonne, Thème V, pp. 179-190 (1998).
- [16] Shima E A., « The effect of rain on the noise reduction of porous asphalt pavement », INTERNOISE, Yokohama (1994).
- [17] European project Silence, "Report of promising new road surfaces for testing", 18 august 2005.

- [18] European project Silence, "Guidelines for low-noise road surface maintenance and rejuvenation", 30 January 2008.
- [19] IPG, "Innovative mitigation measures for road traffic noise", IPG research report (Dutch Innovation Programme on noise mitigation), DVS-2008-018 (2008).
- [20] "DVS-DRI super quiet traffic, International search for pavement providing 10 dB noise reduction", Danish Road Institute, report 178-2009 (2009).
- [21] Sandberg U, e.a, European project Persuade, "State-of-the-Art regarding poroelastic road surfaces", Swedish Road and Transport research Institute (VTI) and Belgian Road Research Centre (BRRC), 19 February 2010 (downloadable from www.persuadeproject.eu).
- [22] "Routes propres et revêtements intacts pour une meilleure qualité de l'air", EMPA (2011).
- [23] LCPC-COLAS, "Des techniques de réduction du bruit routier : les revêtements peu bruyants", Journée CIDB "Réduction du bruit des transports terrestres" (2006).
- [24] European project Silence, "Handbook: Local noise action plans" (2008).
- [25] Goubert L, e.a, ERA-NET ROAD, "Performance management of low noise pavements", a decision support guide (2007).
- [26] "Guideline Silent road", Working group noise (2011).
- [27] Venoliva, "Vehicle Noise Limit Values - Comparison of two noise emission test methods", Final Report, TNO (2011).
- [28] Lerch T, "Akustische Eigenschaften offenerporiger Fahrbahnen" (*Propriétés acoustiques revêtements poreux*), VDIBericht 1791/2003, CD-ROM (2003)
- [29] Lerch, "Prüfung von Wasserdurchlässigkeit und Schallabsorptionsverhalten offenerporiger Asphalte" (*Test de perméabilité à l'eau et comportement d'absorption acoustique de l'asphalte poreuse*), Strasse + Autobahn (2000).
- [30] Beckenbauer, T.; Spiegler, P.; Van Blokland, G.J. et al, "Influss der Fahrbahntextur auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch" (*Influence de la texture de surface sur le bruit de roulement*), Forschungsberichte aus dem Forschungsprogramm des Bundesministeriums für Verkehr-, Bau- und Wohnungswesen und der Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen e.V., Heft 847, August 2002, ISBN 3- 934458-79-3 (2002).
- [31] Shojaati, M.; Blötz, A.; Horat, M.; Caprez, M, "Lärmverhalten verschiedener Belagsoberflächen in der Schweiz" (*Bruit des différents revêtements de chaussée en Suisse*). – Eigenössisches Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartement, ASTRA-Bericht Nr. 462. (2000).
- [32] Brosseaud, Y.; Anfosso Ledee, F, "Les revêtements de chaussées limitant le bruit de roulement, exemple de partenariat et de coopération entre l'administration et les entreprises françaises", LCPC, Centre de Nantes, France. www.infobruit.org/ministeres/publications/sources/LCPC-trans_01.pdf (2001).
- [33] Bartolomaeus W, Glaeser K-P, Hemmert-Halswick A, Ripke O, Weck U, "Lärminderung - Optimierung des Systems Fahrbahn- Fahrzeug-Reifen im Projekt : Leiser Verkehr" (*Réduction du bruit - Optimisation des pneumatiques de véhicule tout terrain dans le projet : Trafic tranquille*), Strasse + Autobahn, 12/2002, 702-707 (2002).
- [34] Ohnishi H, Meiarashi S, Takagi K, Ishikawa K, "Attenuation factors of vehicle noise due to drainage asphalt pavement", J. Acoust. Soc. Jpn, (E) 20, 1 (1999).
- [35] Angst Ch, "Lärmschutz an Strassen, Massnahmen an der Oberfläche innerorts" (*Protection contre le bruit routier...*), Strasse und Verkehr Nr.6/01, p.266-270 (2001).

- [36] Herz G, Matig J, Rode P, Surkamp H, "Gussasphaltdeckschichten im Strassenbau" (*Couches d'asphalte dans la construction routière*), Strasse und Autobahn 1/2003:24-28 (2003).
- [37] Sadzulewsky S, "Standfest und lärmreduzierend: Vorteile und Einsatzmöglichkeiten von Gussasphaltdeckschichten - Asphalt" (*Stable et de réduction du bruit: avantages et les applications des couches d'asphalte. – Asphalte*), Heft n 7/2001, S.24-26 (2001).
- [38] FGSV, Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen 2003: "Merkblatt Dünne Schichten im Heisseinbau auf Versiegelung", (M DSH-V), Ausgabe 2003, 16 S. A5 (FGSV 765), Köln.
- [39] Meunier Y, BBTM Acoustic RM: L'enrobé peu bruyant de "Routière Morin", Revue générale des routes (RGRA). 2001/04. (794) pp52-5 (2001).
- [40] Doisy S, Coin V, "Protocole de la rencontre (LRPC Strasbourg) Lundi 1^{er} décembre 2003 / Strasbourg (France)" (2003).
- [41] Decoene Y, "Durabilité des enrobés à froid par double enrobage", 21^{ème} Congrès belge de la route, <http://genval-dg1.met.wallonie.be/cdrom2/html/themes/7/7.5.4.html> (2001).
- [42] "Manuel du bruit routier, Aide à l'exécution pour l'assainissement", OFEV/OFROU (2006).
- [43] Kragh J, Bendtsen H, "3 years performance of twin-lay drainage asphalt in city street", Acta Acustica, Vol.89 (2003) Suppl.1, Euronoise Naples (2003).
- [44] Bendtsen H, Larsen L E, "Two-layer porous pavements and noise reductions in Denmark", Ninth International Conference on Asphalt Pavements, August 17-22, 2002, Copenhagen, International Society for Asphalt Pavements, 2003, CD-ROM, 4:1-3, 13 s (2003).
- [45] Dutilleux G, Ecotière D, "Automatic characterisation of ground surfaces from in situ measurements", ASA-EAA-SFA Acoustics'08, Paris, juin 2008.
- [46] "Method for Determining the Acoustic Impedance of Ground Surfaces", ANSI-ASA_S1.18-2010.
- [47] Dussautoir T, "Bilan et analyse acoustique des enrobés peu bruyants mis en œuvre sur les routes départementales", CG92/DIT/DEGD, août 2008.
- [48] Kragh J, Nielsen E, Olesen E, Goubert L, Vansteenkiste S, De Visscher J, Sandberg U, Karlsson R, "ERANET ROAD project OPTHINAL Optimization of Thin Asphalt Layers", Final Report, March 2011.
- [49] Sandberg U, Kragh J, Goubert L, Bendtsen H, Bergiers A, Biligiri K P, Karlsson R, Nielsen E, Olesen E, Vansteenkiste S, "Optimization of Thin Asphalt Layers – State-of-the-Art Review", April 2011.
- [50] Forschungsinstitut Geräusche und Erschütterungen, "Geräuschemissionen auf Betonpflaster", (*Bruit sur une chaussée en béton*), FIGE GmbH, Kaiserstrasse 100, D-5120 Herzogenrath, étude commandée par Bundesverbandes Deutsche Beton- und Fertigteilindustrie e.v., Bonn, février 1992.
- [51] URF, "Silence ...on roule, ou comment les acteurs de la filière routière se mobilisent pour réduire les émissions sonores", Union Routière de France, septembre 2011.
- [52] IPG, "Lijst Stille Personenwagenbanden", (*Liste des pneumatiques silencieux pour véhicules légers*), www.stillerverkeer.nl/stillebanden/downloads/nationaal_bandenlijst.pdf, juni 2007.
- [53] Goubert L e.a. Bruxelles, "Performance management of low-noise pavements - technical report", ERANET ROAD, Belgian Road Research Centre, Copenhagen, Danish Road Institute, Novembre 2007.
- [54] G.G. van Bochove, T.T.P. van Buël. Bijdrage CROW Infradagen, "Een nieuwe methode voor het reinigen van Zeer Open Asphalt", (*Une nouvelle méthode pour nettoyer l'asphalte poreux*), Pays-Bas, 2008.
- [55] Luminari M, SI.R.U.US project, Final Technical Report (2003).