

7. Revêtements routiers

7.1. Types de revêtements routiers les plus utilisés

7.1.1. Introduction

On distingue trois types de revêtements routiers: les revêtements bitumineux, les revêtements en béton et les revêtements modulaires. Il existe également des semi-revêtements, mais ils sont moins adaptés au trafic. Une technique complémentaire consiste à appliquer un enduit superficiel sur un revêtement existant.

La surface doit être de bonne qualité pour permettre aux usagers de rouler confortablement et en toute sécurité. Alors que la structure (revêtement, ainsi que la fondation et la sous-fondation) assure une bonne répartition des charges du trafic, la surface offre la rugosité nécessaire à la sécurité. La texture de la surface détermine également le confort de roulement. A des vitesses plus élevées, la texture de la surface contribue à diminuer le bruit de roulement.

La structure de la route varie en fonction du type de revêtement. Un revêtement en béton est ainsi généralement réalisé en une seule couche. Dans le cas du béton coloré, ou de routes où la vitesse est élevée, il est possible de réaliser un revêtement bicouche « frais sur frais ». Un remplacement partiel du revêtement n'est dans ce cas-là pas possible, mais il est néanmoins possible d'appliquer un traitement superficiel ou un recouvrement bitumineux, pour améliorer la planéité, la rugosité ou pour diminuer le bruit de roulement.

Dans le cas d'un revêtement bitumineux, mais aussi d'un revêtement en béton ou modulaire, on réalise plusieurs couches. Un revêtement bitumineux est toujours constitué d'une couche de roulement et d'une ou de plusieurs couches sous-jacentes. Ces dernières procurent la durabilité structurelle, tandis que la couche de roulement se charge d'offrir la texture superficielle et assure par conséquent une bonne rugosité et une faible production sonore. La couche de roulement doit être remplacée au cours de la durée de vie prévue. La structure typique d'une chaussée avec un revêtement bitumineux, en béton ou modulaire est présentée à la Figure 1.

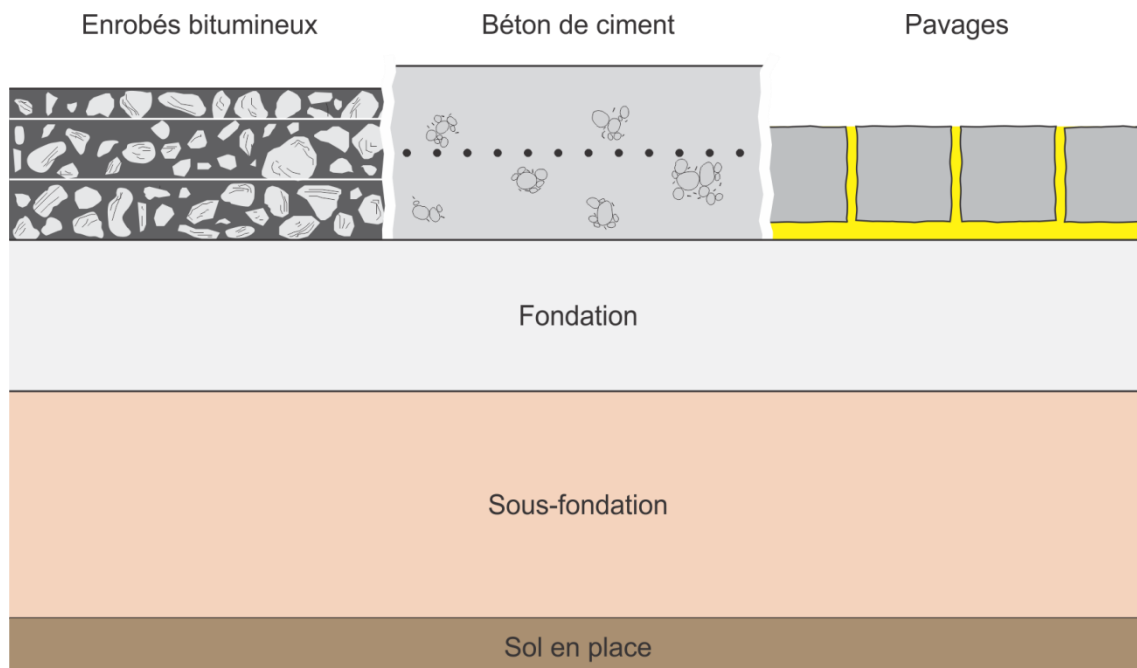


Figure 1 - structure typique d'une chaussée.

Il existe également un autre type de revêtement, encore expérimental: le revêtement poroélastique. Ce type de revêtement contient, en plus des granulats classiques, des granulats de caoutchouc, et du polyuréthane en guise de liant. Il a pour caractéristique de réduire fortement le bruit. Sa durabilité est en train d'être améliorée, et il fait l'objet d'essais dans des conditions réelles.

Les revêtements modulaires sont constitués de pavés (en béton, en pierre naturelle ou en terre cuite), placés sur une couche de pose. La texture des pavés procure la rugosité nécessaire. L'appareillage et la taille des pavés déterminent en grande partie, en plus de la texture, le niveau sonore final du revêtement.

7.1.2. Types de revêtements

1. REVETEMENTS BITUMINEUX

Celui-ci se compose d'un mélange de granulats, de sable, de filler et de liant. La granularité des granulats de la couche de roulement est limitée à 10 mm, tandis qu'elle peut aller jusqu'à 20 mm pour les couches sous-jacentes. Les gros granulats représentent environ 40 à 50 % du poids. La granularité du sable varie entre 0 mm et 2 mm. Le poids du sable est assez proche de celui des gros granulats. Les mélanges bitumineux contiennent toujours une certaine quantité de filler, de très petites particules dont les dimensions sont inférieures à 0,063 mm. Les liants les plus usuels sont le bitume (asphalte), bien qu'il existe d'autres types de liants, comme des résines synthétiques, par exemple. Le pourcentage de liant représente 4 à 8 % du poids (et est plus important encore dans les revêtements poroélastiques). Il a une double fonction: lier les constituants de la couche de roulement les uns aux autres, d'une part, et assurer une bonne liaison entre la couche de roulement et la couche sous-jacente d'autre part.

La Figure 2 donne une représentation schématique du béton bitumineux classique et du béton bitumineux drainant. On utilise des gros et des petits gravillons. Combinés au liant, les petits gravillons remplissent la plupart des vides entre les gros gravillons. Il y a 3 à 5 % de vides qui ne sont pas interreliés. Ce type de béton bitumineux est appelé asphalte dense (AC – asphalt concrete, Figure 3). La figure ci-après représente un béton bitumineux drainant (PA – porous asphalt): on utilise exclusivement des gravillons "plus gros" et le bitume ne remplit pas les creux laissés entre les gravillons (Figure 4). Il subsiste de nombreux vides (20 à 25 %), qui communiquent les uns avec les autres. La Figure 2 représente des revêtements en AC et en PA.

Quand utiliser ou non un AC?

Il s'agit d'un type de revêtement conventionnel avec un bon rapport qualité/prix, et de qualité acoustique moyenne. Sa résistance à l'orniérage aux endroits où se présente du trafic lourd (lignes de bus, arrêts de bus) est plutôt limitée, ce qui fait qu'il y est déconseillé. Il est également déconseillé pour les routes à vitesse plus élevée (> 90 km/h) en raison du risque d'aquaplanage.

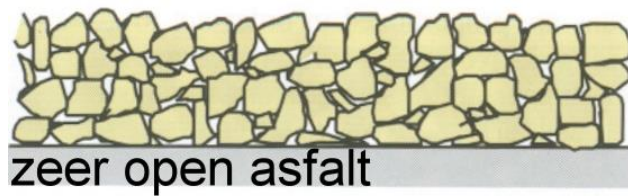
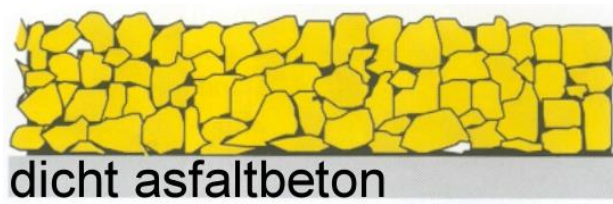


Figure 2 - représentation schématique d'un béton bitumineux étanche (AC) et d'un béton bitumineux drainant (PA).



Figure 3 - béton bitumineux étanche (AC).





Figure 4 - béton bitumineux drainant (PA).

On comprendra aisément la nécessité d'utiliser un mélange approprié de gravillons (granularité) - dont les dimensions ne peuvent excéder des limites fort étroites - pour obtenir la structure ouverte du PA. Une opinion erronée largement répandue prétend que le PA est moins solide que l'AC. Il ne suffit cependant pas d'utiliser des agrégats possédant les dimensions adéquates, le PA doit aussi être compacté par vibrations ou au rouleau après la pose. Il faut également prévoir une couche étanche sous la couche supérieure en PA, 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 d'AC.

Quand utiliser ou non un PA?

Ce type de revêtement est encore rarement utilisé en Belgique en raison de l'entretien hivernal (plus) difficile et de son prix plus élevé, voir même fortement plus élevé (PA bicouche), et de sa durée de vie plus réduite par rapport à l'AC. Il possède une bonne résistance à l'orniérage, mais est plus sensible au plumage. Il offre une réduction sonore initiale intéressante, surtout en version bicouche. Il est déconseillé sur les routes où la vitesse est peu élevée et/ou le trafic est peu important, en raison d'un colmatage rapide des vides, ce qui a pour conséquence de diminuer la réduction sonore. Il peut être intéressant sur les routes à vitesse plus élevée, grâce à la réduction sonore qu'il permet, mais aussi car il réduit efficacement les éclaboussures d'eau et le risque d'aquaplanage en cas de fortes averses. Il ne peut être mis en oeuvre que sur de longues sections droites, car la mise en oeuvre manuelle est très difficile. Il est également déconseillé aux endroits où se produisent des efforts tangentiels.

Il existe de nombreuses sortes de bétons bitumineux en plus de l'AC et du PA:

- Le SMA est un compromis entre l'AC et le PA. Les agrégats 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 PA (voir Figure 5). Il y a beaucoup de vides autour des gravillons relativement gros qui se trouvent à la surface, mais le revêtement ne présente pas de pores en raison de la grande quantité de fines utilisées. Le SMA est plus résistant à l'usure et plus solide que l'AC, mais requiert davantage de soin lors de la pose.

Quand utiliser ou non un SMA?

Ce type de revêtement est un peu plus cher que l'AC. Les variantes de faible granulométrie (< 10 mm) peuvent réduire le bruit. Grâce à son squelette pierreux, le SMA offre une meilleure résistance à l'orniérage que l'AC. Il convient pour la plupart des routes, sauf en présence de trafic lourd roulant à une vitesse supérieure à 90 km/h. Il n'est pas recommandé pour les sections de route dont la géométrie est complexe et qui nécessitent une mise en oeuvre manuelle, ni pour les revêtements principalement destinés aux usagers légers (piétons, cyclistes).

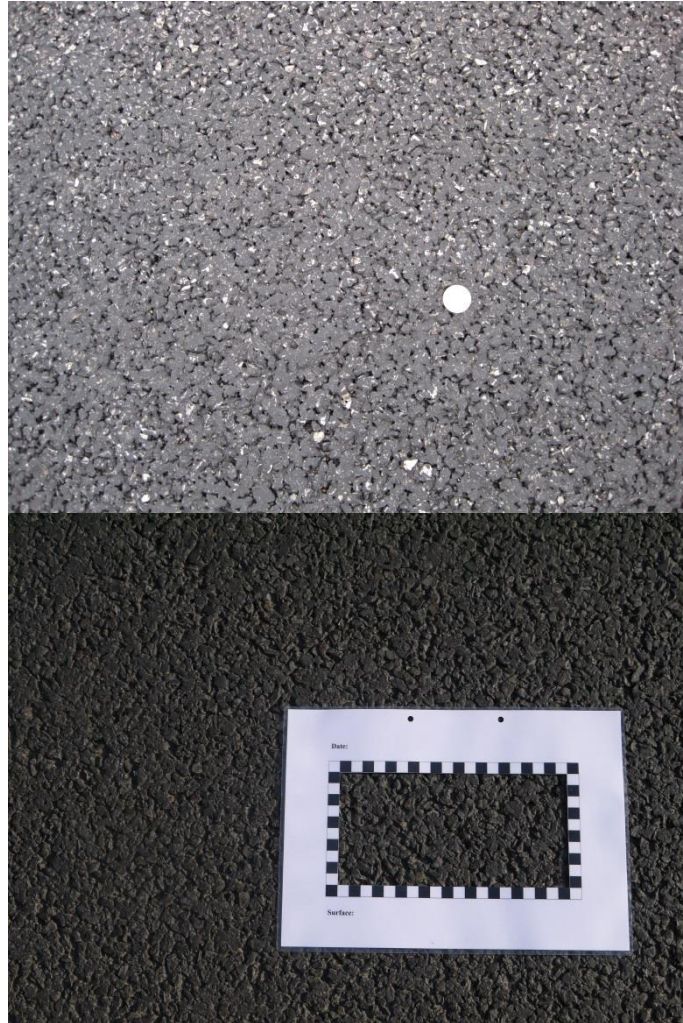


Figure 5 - splittmastixasphalt (SMA).

- Le béton bitumineux clouté est de l'AC sur lequel des gravillons sont épandus et roulés à chaud (Figure 6). Le revêtement routier présente ainsi une meilleure résistance à l'usure et une rugosité améliorée.

Quand utiliser ou non un béton bitumineux clouté?

Le béton bitumineux clouté offre une meilleure rugosité que l'AC conventionnel, mais est totalement tombé en désuétude en raison de ses mauvaises qualités acoustiques. Il est aussi sensible à l'orniérage que l'AC. Son utilisation est déconseillée, aussi bien en milieu urbain, sur des routes secondaires que sur des autoroutes.



Figure 6 - béton bitumineux clouté.

- les bétons bitumineux minces, aussi appelés revêtements minces. Cette technique est généralement utilisée pour réparer un revêtement routier usé, à certains endroits ou sur toute la surface. Elle est bon marché et peut être mise en oeuvre sur des routes où l'intensité du trafic n'est pas trop importante. On emploie le plus souvent des gravillons de granulométrie réduite pour réaliser un béton bitumineux mince. Il est même possible de réaliser des bétons bitumineux minces poreux. On distingue trois sous-catégories:
 - béton bitumineux mince (20 - 25 mm d'épaisseur) (voir Figure 7)
 - béton bitumineux ultramince (12 -18 mm)
 - microcouche de béton bitumineux (6 -12 mm)

Quand utiliser ou non des revêtements minces?

Les revêtements minces représentent souvent une manière intéressante et avantageuse de réduire le bruit routier, même à des vitesses moins élevées (> 30 km/h). Ils présentent généralement une bonne rugosité et ne sont pas plus chers que l'AC. La réduction sonore initiale est bonne voire excellente, mais il ne faut pas perdre de vue que les revêtements offrant les meilleures réductions sonores sont ceux qui perdent le plus vite leurs bonnes qualités acoustiques. Leur durée de vie est également moins longue (7 à 9 ans) et ils sont plus sensibles à l'usure et à la dégradation. Ils sont déconseillés pour les endroits où se produisent de nombreux efforts tangentiels (carrefours très fréquentés, arrêts de bus, etc.) et dans les côtes. Les dégradations les plus courantes sont le plumage et le détachement de la couche sous-jacente. Il est préférable de les mettre en oeuvre là où les sections de route sont rectangulaires et régulières, car la mise en oeuvre manuelle (autour des îlots, par exemple) est difficile. Les revêtements minces peuvent être appliqués en milieu urbain, sur les routes secondaires ainsi que sur les autoroutes.

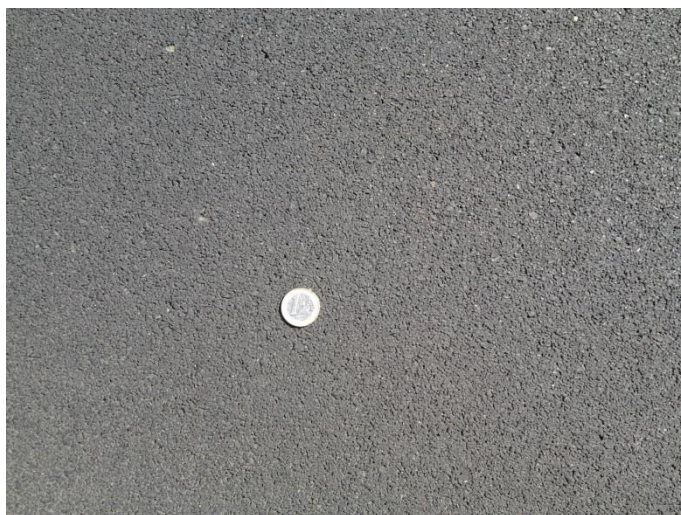


Figure 7 - revêtement mince.

2. REVETEMENTS EN BETON DE CIMENT

Les revêtements en béton de ciment sont caractérisés par une rigidité élevée et une longue durée de vie. Il est dès lors essentiel de choisir dès le départ la composition la plus adaptée à l'environnement. Le béton routier est constitué de gros granulats, de sable, de ciment, d'eau et de quelques adjuvants comme les entraîneurs d'air et les (super)plastifiants. Pour obtenir une route durable, il faut non seulement un squelette minéral adéquat, mais aussi des granulats de qualité suffisante et une composition adaptée. Pour obtenir une bonne texture superficielle, le revêtement en béton est soit dénudé chimiquement (technique recommandée pour les routes à vitesse élevée), soit brossé pour les chaussées moins sollicitées, où la vitesse est moins élevée.

Les premières routes en béton ont été réalisées avec des granulats de grandes dimensions (32 à 40 mm). Des joints transversaux étaient aussi souvent réalisés dans le béton frais, afin d'obtenir un revêtement rugueux et sûr, ainsi qu'une bonne évacuation des eaux, mais avec comme désavantage une production sonore élevée. Vers la fin des années septante, on a commencé à dénuder la surface du béton de manière chimique, ce qui a permis d'obtenir une bonne rugosité tout en faisant disparaître les pics aigus que l'on pouvait entendre sur les revêtements striés transversalement.

Une optimisation de la technique de dénudage (voir Figure 8) a permis de diminuer fortement le bruit de roulement (le principe actuel du dénudage consiste à limiter la taille des granulats présents en surface, soit en travaillant en deux couches, posées « frais sur frais », soit en prévoyant un excès de granulats compris entre 4 et 6,3 mm (ou 8 mm). L'objectif est d'augmenter la proportion de gravillons compris entre 4 et 6,3 mm jusqu'à représenter 20 à 25 % du squelette minéral (mélange de sable et de granulats). Lors du compactage, ces granulats remontent à la surface et sont ensuite exposés lors du dénudage. La qualité de ces granulats est primordiale pour pouvoir garantir une bonne rugosité dans le temps. En limitant la granularité du squelette minéral à 20 mm voire même à 14 mm, le bruit de roulement diminue.

Quand utiliser ou non du béton fin?

Comme tous les revêtements en béton, le béton fin a une excellente durabilité. Sa mise en œuvre est un peu plus compliquée et chère, mais lorsqu'il est réalisé dans les règles de l'art, il peut offrir une qualité acoustique acceptable (dans le meilleur des cas, comparable à l'AC). Lorsque les matériaux sont correctement choisis, la rugosité est garantie à vie. Il constitue un choix judicieux pour les routes secondaires et les autoroutes si les exigences acoustiques ne sont pas trop sévères. En principe, il convient aussi pour les rues et les places en milieu urbain, mais les travaux aux impétrants peuvent constituer un problème.

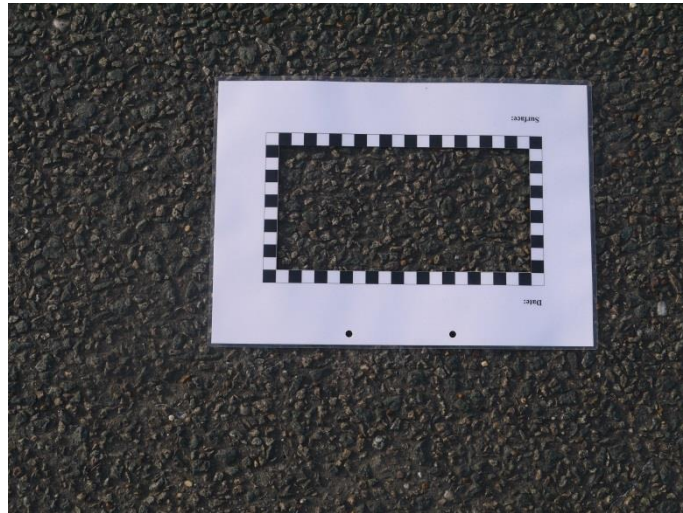


Figure 8 - béton fin.

Dans le cas des routes où la vitesse est moins élevée, on réalise un brossage de la surface (voir Figure 9). Immédiatement après la pose, on effectue un brossage de la surface. Les brosses utilisées ont des poils compacts en acier ou en PVC. Seul un brossage transversal est autorisé sur les routesⁱ. Il peut également être longitudinal sur les pistes cyclables et les routes agricoles.

Quand utiliser ou non du béton brossé?

Les mêmes considérations que pour le béton fin s'appliquent, mais la mise en œuvre est un peu plus facile et moins chère. Il présente cependant une qualité acoustique moindre.



Figure 9 - béton brossé.

Un traitement superficiel spécial est le béton impriméⁱⁱ (voir Figure 10). Cette technique permet de réaliser des motifs spéciaux sur la surface du béton. En fonction du moule utilisé, il est possible de reproduire l'aspect de pavés en terre cuite ou en pierre naturelle. L'impression est associée à un traitement antidérapant par l'épandage de sable de quartz. Le bruit de roulement sera dans ce cas partiellement déterminé par les motifs imprimés et par la vitesse des véhicules en passage. Souvent, ces impressions sont utilisées à dessein pour augmenter le bruit de roulement et ainsi ralentir le trafic.

Quand utiliser ou non du béton imprimé?

Le béton imprimé est recommandé lorsque, pour des raisons esthétiques, on souhaite reproduire l'aspect de pavés de béton ou en pierre naturelle, qu'une augmentation du bruit de roulement ne représente pas un problème et où le trafic lourd produit des sollicitations importantes (passage fréquent de bus, par exemple).



Figure 10 - béton imprimé.

Les revêtements en béton présentent l'avantage de ne nécessiter que peu d'entretien. Dans le cas des dalles de béton, l'entretien consiste à maintenir les joints remplis. Il peut parfois être nécessaire d'améliorer les caractéristiques superficielles suite à un usage intensif, en raison de la longue durée de vie du revêtement ou bien de l'utilisation de granulats non adaptés, dont la résistance au polissage n'est pas suffisante. L'écaillage dû à l'action des sels de déverglaçage, provoqué par une mauvaise protection lors de l'exécution, peut aussi nécessiter un traitement superficiel.

Les cahiers des charges types présentent plusieurs méthodes pour rétablir ou pour améliorer la texture superficielle d'un béton déjà posé. Outre une amélioration de la rugosité et de la planéité, le traitement superficiel aura aussi un impact positif sur le bruit de roulement, a fortiori dans le cas de routes plus anciennes.

- Le meulage du béton à l'aide d'un disque diamantⁱⁱⁱ consiste à réaliser sur la surface de petites rainures de 3 à 4 mm et distantes entre elles de 1,5 à 3,2 mm. Celui-ci permet d'améliorer la planéité tout en conservant la rugosité et en diminuant le bruit de roulement. Le meulage est de préférence réalisé dans le sens longitudinal (cela est même obligatoire dans le SB 250).
- Le fraisage fin est réalisé à l'aide d'une fraiseuse à froid^{iv}, équipée d'un nombre accru de fraises. Cette méthode permet également d'améliorer la planéité tout en conservant la rugosité et en diminuant le bruit de roulement. Elle contient aussi pour préparer la surface en vue d'un recouvrement. Le fraisage fin se fait toujours dans le sens longitudinal. La distance entre les rainures est au maximum de 8 mm.
- Il existe également d'autres méthodes, comme le bouchardage^v et le grenailage^{vi}. Le bouchardage est appliqué localement pour éliminer une couche de mortier superficielle, et mener à une amélioration de la rugosité tout en conservant la planéité. Lors de celui-ci, la surface est frappée par des marteaux, ce qui peut donner lieu à des microfissures. Le grenailage consiste à projeter de manière intensive de petites billes d'acier à une vitesse élevée. La poussière et les billes sont ensuite récupérées à l'aide d'un système d'aspiration. On peut également procéder avec de l'eau sous haute pression, mais l'effet est moindre. Le grenailage a aussi pour résultat d'améliorer la rugosité.
- Le polissage de la surface durcie est souvent réalisé à des fins esthétiques, tant à l'intérieur qu'à l'extérieur. Dans ce dernier cas, il est important de ne pas polir trop finement, pour maintenir une rugosité suffisante. Le niveau sonore n'entre ici pas en compte car ce traitement n'est pas appliqué sur des routes « circulées ».
- Aux Etats-Unis, il existe une technique optimisée de meulage au disque diamant. En faisant varier la configuration des disques, une texture négative est obtenue, ce qui confère à la surface une meilleure rugosité tout en diminuant le bruit de roulement.

Le niveau sonore d'un revêtement en béton ne dépend pas uniquement de sa texture superficielle. Il est vrai que des affaissements au niveau des joints peuvent conduire à une mise en escalier, ce qui a pour conséquence de produire du bruit et des vibrations. Pour éviter ces affaissements et la formation de marches, il est nécessaire d'opter pour une bonne structure. Dans le cas des routes plus lourdement sollicitées, où passent de nombreux bus, il faut toujours placer des goujons dans les joints. Ceux-ci assureront un bon transfert vertical des charges entre les dalles sans pour autant nuire au bon fonctionnement des joints. Une fondation de qualité est aussi cruciale pour éviter l'érosion suite à la pénétration d'eau et à l'effet de pompage. La règle d'or est de maintenir les joints fermés. Il faut donc toujours prévoir un bon jointoiement pour éviter que l'eau ne s'infiltre le long des joints transversaux ou longitudinaux. Pour les routes très lourdement sollicitées, le béton armé continu peut constituer une bonne solution. Celui-ci ne requiert pas de joints transversaux, et par conséquent, seul le joint longitudinal doit être entretenu.

3. PAVAGES

Les pavages sont constitués de pavés placés sur une couche de pose. Les joints entre les pavés doivent toujours être remplis, afin d'éviter qu'ils ne glissent, se renversent et finissent par se détacher. L'appareillage utilisé déterminera en grande partie le bruit. Le niveau sonore n'est pas spécialement déterminé par le bruit de roulement, étant donné que la vitesse est généralement peu élevée sur des revêtements de ce type, mais est plutôt dû aux vibrations provoquées par les différences de niveau entre les pavés, a fortiori avec des pavés en pierre naturelle classiques. Ces revêtements ont parfois pour but d'augmenter le bruit, comme les bandes rugueuses, par exemple. Le bruit et les vibrations supplémentaires auront pour effet de faire diminuer la vitesse.

Il est néanmoins aussi possible de réaliser des pavages peu bruyants. Il est pour ce faire crucial d'avoir une bonne planéité, ce qui est possible avec des pavés. Pour que ce type de revêtements soit durable, et pour maintenir la planéité dans le temps, une bonne structure est indispensable. Par structure, on entend non seulement la fondation et la sous-fondation, mais aussi les contrebutages et l'évacuation des eaux, qui sont des paramètres non négligeables.

Pavés en pierre naturelle

Ces pavés sont constitués de pierre naturelle comme le porphyre, le quartzite, le granit ou le grès. Ils sont généralement posés de manière bombée, afin que se produise un effet de voûte. Ils sont principalement utilisés pour des raisons esthétiques, culturelles et historiques et sont souvent associés à une augmentation de la production sonore, comme mentionné ci-avant, en raison des inégalités de la surface qui provoquent plus de vibrations (voir Figure 11).

Quand utiliser ou non des pavés de pierre naturelle?

Les pavés de pierre naturelle sont utilisés pour des raisons culturelles, historiques et/ou esthétiques. Ils sont fortement déconseillés lorsque la vitesse du trafic est supérieure à 50 km/h pour des raisons de sécurité (glissance par temps de pluie) et de bruit. Le bruit de roulement est également plus élevé entre 20 et 50 km/h, ce qui fait que le gestionnaire routier doit s'assurer que cela ne constitue aucun problème environnemental. Idéalement, ces pavés sont posés dans des rues où la vitesse n'excède pas 20 km/h, ou bien où il n'y a pas de trafic du tout. Les pavés ont tendance à s'affaisser, ce qui augmente encore leur bruyance. Ils sont lisses et inconfortables pour les cyclistes et les piétons (hauts talons !). Ils présentent par contre l'avantage de pouvoir être recyclés de manière illimitée.

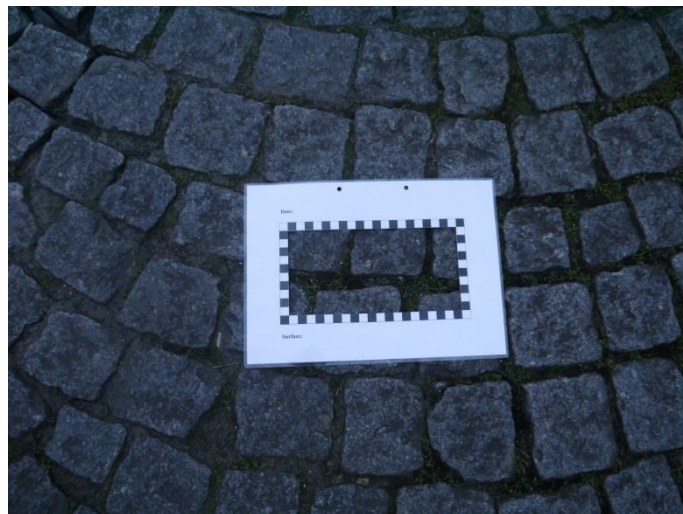


Figure 11 - revêtement en pavés de pierre naturelle.

Pavés

Les pavés peuvent être constitués de béton (Figure 12), d'argile cuite ou de pierre naturelle. Ils permettent de réaliser des revêtements beaucoup plus plats. Ici aussi, la vitesse doit être limitée pour éviter que les joints ne se vident par aspiration, ce qui a un impact positif sur le bruit de roulement. L'appareillage peut cependant provoquer l'apparition de bruits tonneaux, probablement lorsqu'on utilise des pavés profilés.

La rugosité des pavés en béton est obtenue en réalisant une couche d'usure sur la surface lors de la production. Les pavés peuvent aussi être dénudés si souhaité. Les pavés en pierre naturelle doivent parfois être cardés pour obtenir une rugosité suffisante.

Quand utiliser ou non des pavés en béton?

Ils sont recommandés dans les rues en milieu urbain (max. 50 km/h). Leur mise en œuvre est intensive et lente, et par conséquent onéreuse. Ils présentent par contre l'avantage de pouvoir être démontés et remis en place lors de travaux aux impétrants. Ils ont un niveau acoustique similaire à l'AC.



Figure 12 - pavés en béton.

Revêtements drainants^{vii}

Les pavages drainants (Figure 13) jouent un rôle important dans le cadre d'une gestion intégrale des eaux, où le risque d'inondation doit être limité au maximum, en tentant notamment de les stocker sur place aussi longtemps que possible. Grâce à un concept intégral de perméabilité, de la surface au sol, les eaux de pluie sont stockées provisoirement, de préférence dans la sous-fondation, après quoi elles sont, dans la mesure du possible, infiltrées dans le sol. Les pavages drainants sont utilisés comme système de stockage et d'infiltration sur les parkings, les places, les routes à trafic restreint, les pistes cyclables, etc.

Les pavages drainants ne présentent pas seulement l'avantage d'empêcher que les eaux superficielles ne s'écoulent directement dans les égouts ou le système d'évacuation, mais assure aussi une augmentation du niveau de la nappe phréatique. Lorsqu'aucune infiltration n'est possible, l'eau est alors stockée provisoirement dans la structure et évacuée de manière différée vers un bassin d'infiltration ou un caniveau proche.

La perméabilité des pavés est obtenue grâce à la structure poreuse du pavé même ou grâce à la présence de joints élargis ou d'ouvertures de drainage entre les pavés. Les dalles-gazons peuvent aussi être utilisées comme revêtement drainant, à condition qu'elles soient remplies de granulats ou de suffisamment d'herbe.

Le principe de fonctionnement général d'un revêtement drainant en pavés de béton est le suivant:

- L'eau de pluie s'infiltré via les pavés drainants, le matériau de jointoiement et la couche de pose vers la fondation. Les pavés laissent passer l'eau et empêchent ainsi tout ruissellement en surface.
- L'eau de pluie est de préférence stockée dans la sous-fondation, la fondation servant de réserve de stockage supplémentaire et procurant la portance nécessaire pour le trafic routier habituel.

- L'eau de pluie s'infiltré dans le sol, en fonction de sa perméabilité.
- L'eau de pluie qui ne s'infiltré pas dans le sol est évacuée de manière différée via des réducteurs de débit vers des caniveaux ou des systèmes d'infiltration situés à proximité ou vers le système d'égouttage.

Des structures standard sont fixées en fonction de l'intensité du trafic et de la perméabilité du sol.

Application:

- Aux endroits où la circulation est limitée, compte tenu de la portance moindre de la fondation (lorsqu'elle est saturée en eau). Il s'agit par exemple des parkings (d'entreprise) pour les voitures particulières, des centres commerciaux, des rues d'habitation, des emplacements de stationnement, des places et des rues piétonnes, des pistes cyclables et trottoirs, des accès et terrasses.
- Les pavés drainants ne sont pas utilisés sur des lieux de captage, sauf en présence de mesures spécifiques de protection du sol.
- Les pavés en béton drainants seront de préférence évités dans les zones où du sel de déverglaçage est utilisé fréquemment, afin de prévenir toute pollution des eaux souterraines.
- Dans un souci de confort, les pavés en béton à joints élargis ou à ouvertures de drainage sont moins appropriés pour les pistes cyclables et voies piétonnes. Les pavés en béton poreux avec un léger chanfrein (ou plats) posés avec des joints étroits sont plus appropriés.

Avantages:

- Pas besoin d'avaloirs
- Pas besoin d'un système d'évacuation des eaux de pluie, ce qui est un avantage pour l'infiltration des habitations sur leur propre parcelle
- Pas besoin de système et/ou de volume d'infiltration supplémentaire pour la superficie de la route
- Une pente limitée peut être appliquée
- Des variations dans la couleur et dans l'appareillage peuvent permettre de bien délimiter les zones pour les différents usagers et ainsi augmenter la sécurité
- Aucune formation de flaque, même en cas d'averses imprévisibles

Inconvénients:

- Eviter que de l'eau ne rentre dans les habitations: pas de trottoirs en pavages drainants, mais laisser l'eau s'écouler sur la route ou la zone de stationnement
- Placement des impétrants: de préférence sous un trottoir sans revêtement drainant car les réparations sont difficiles à suivre et peuvent rendre la fondation imperméable si l'on n'a pas opté pour le bon matériau



Figure 13 - pavage drainant.

4. ENDUITS ET MBCF

Un enduit a une épaisseur de 5 à 15 mm. Une couche de liant est répandue sur le support sous-jacent, qui doit être plat et en bon état. Dans cette couche de liant, qui sert de « colle », on intègre ensuite des gravillons (Figure 14). Il s'agit dans ce cas d'un enduit monocouche à simple gravillonnage. Cette solution est bien adaptée pour les routes à trafic restreint. Le gravillonnage peut également se faire en deux phases: tout d'abord une couche de gravillons moyennement gros et ensuite les gravillons plus fins. Il s'agit alors d'un enduit monocouche à double gravillonnage. Celui-ci confère à la surface une rugosité élevée, et est surtout destiné aux routes à trafic rapide. Il est également possible de poser un second enduit sur un premier, en répandant à nouveau une couche de liant puis des gravillons. On parle alors d'enduit bicouche. Celui-ci est adapté pour les routes très fréquentées et/ou à trafic lourd, qui possèdent déjà un revêtement solide. Il est parfaitement possible de combiner l'enduit avec un autre type de revêtement, comme par exemple une surface en béton de ciment.

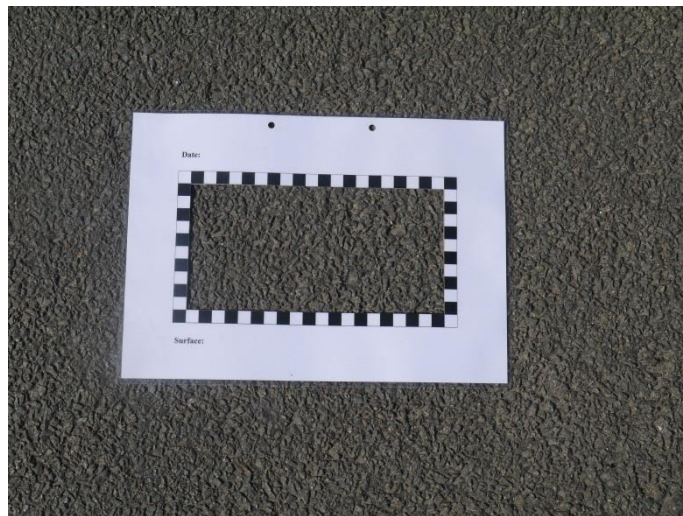


Figure 14 – enduit.

Un “slurry seal” ou matériau bitumineux coulé à froid (MBCF) est obtenu en coulant un mélange liquide de granulats et d’émulsion de bitume, avec éventuellement quelques additifs et des fibres. Les MBCF sont très sensibles aux conditions météorologiques. Dans la pratique, la période d’exécution est limitée de la mi-avril à fin-septembre. Il est possible de couler une ou deux couches, qui sont ensuite compactées à l’aide d’un rouleau. Les granulométries sont 0/2, 0/4, 0/6,3 ou 0/10.

Quand utiliser ou non des enduits/MBCF?

Ces types de revêtements peuvent être recommandés pour les revêtements qui sont encore en bon état, mais dont la surface laisse à désirer, comme des routes en béton d’un certain âge. Ils ne sont pas adaptés sur les revêtements instables (pavés en béton, en pierre naturelle) car la structure d’origine va vite se manifester à la surface et des fissures de fatigue apparaître. Une qualité acoustique similaire à celle de l’AC peut être obtenue. Les enduits ne peuvent pas être mis en oeuvre entre la mi-octobre et la mi-avril. Les MBCF peuvent uniquement être mis en oeuvre à la belle saison (printemps, été). Ils sont sensibles aux conditions météorologiques lors de leur mise en oeuvre.

7.1.3. Propriétés acoustiques de quelques types de revêtements typiques en milieu urbain

En juin 2015, le CRR a réalisé à Gand une campagne de mesures pour déterminer les qualités acoustiques de quelques revêtements typiques à l’aide de la remorque CPX (voir **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Une série de revêtements du centre-ville de différents types ont été sélectionnés (AC, enduit, béton, pavés en béton et pavés en pierre naturelle), à différents degrés d’usure (A-B: excellent à bon; C1-C3: modéré à mauvais et D: très mauvais). La vitesse maximale autorisée était de 30 km/h dans la plupart des rues.

Les résultats à 30 km/h, mesurés avec le pneu de référence SRTT, sont donnés à la Figure 15. Bien qu’il s’agisse d’une campagne d’ampleur limitée, et que les résultats doivent donc être interprétés avec la prudence qui s’impose, quelques tendances se sont néanmoins dégagées:

- L’AC, les enduits, le béton et les pavés en béton en bon état présentent une émission sonore du même ordre de grandeur à 30 km/h
- Plus le revêtement est usé, plus il a tendance à devenir bruyant. Ce phénomène pourrait être rendu plus clair en réalisant des mesures sur un nombre plus élevé de revêtements (en bon et en mauvais état)
- Les pavés en pierre naturelle sont déjà assez bruyants en bon état, et sont extrêmement bruyants à 30 km/h lorsqu’ils commencent à s’affaïsser

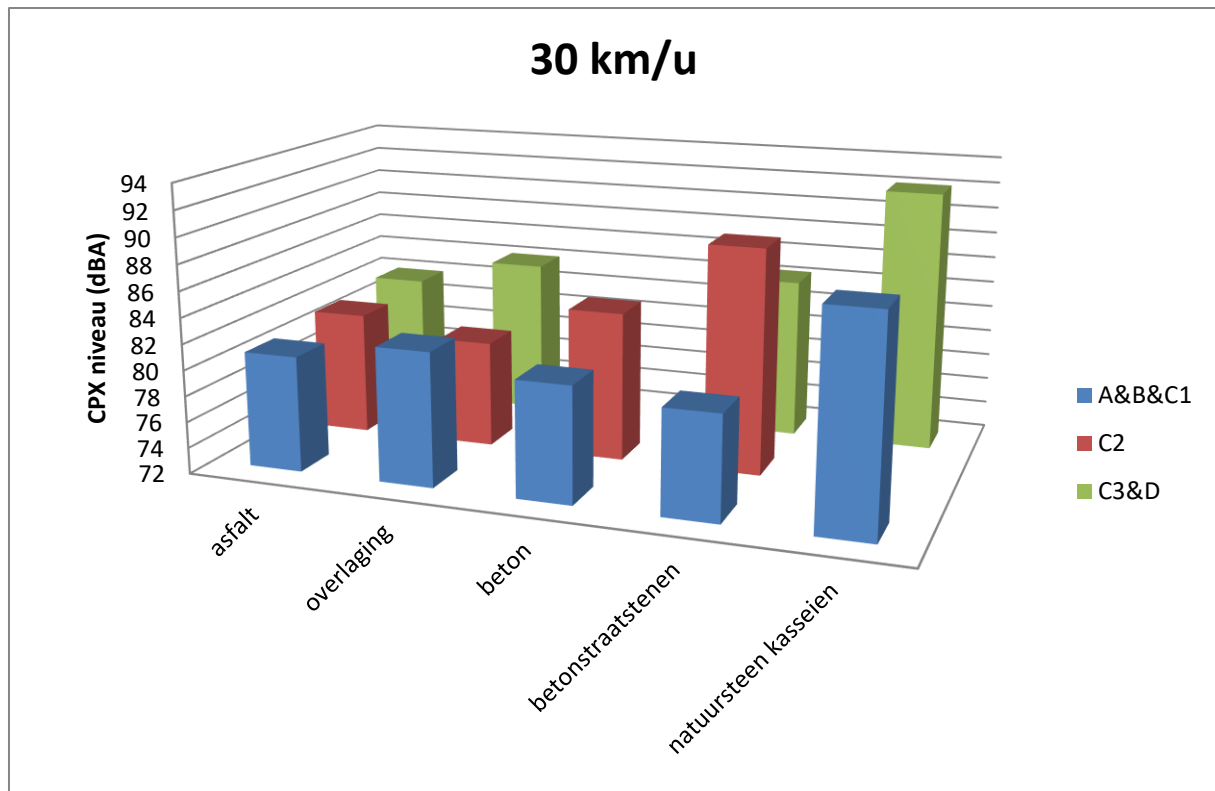


Figure 15 - niveau sonore CPX de quelques revêtements couramment utilisés en milieu urbain, à des degrés divers d'usure.

Figure 16 - Figure 25 présentent quelques revêtements typiques à différents niveaux d'usure, sur lesquels des mesures ont été réalisées.

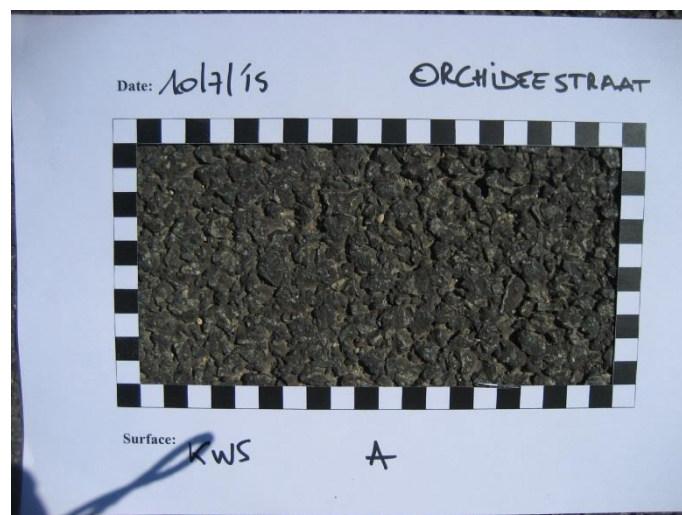


Figure 16 - Orchideestraat, Gand (enrobé, A).

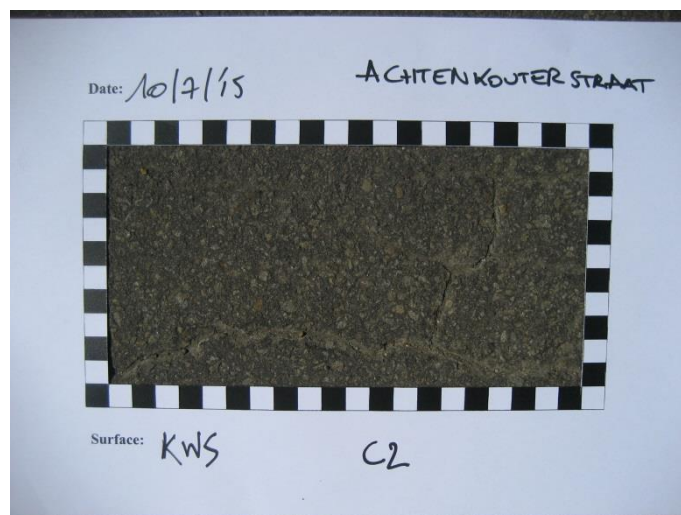


Figure 17 - Achterkouterstraat, Gand (enrobé, C2).



Figure 18 - Onafhankelijkheidslaan, Gand (recouvrement, C2).



Figure 19 - Koopvaardijlaan, Gand (recouvrement, D).



Figure 20 - Kerselaarstraat, Gand (béton, C1).



Figure 21 - Alfons Braeckmanlaan, Gand (béton, C2).



Figure 22 - Duifhuisstraat, Gand (pavés en béton, B).



Figure 23 - Narcisstraat, Gand (pavés en béton, C3).

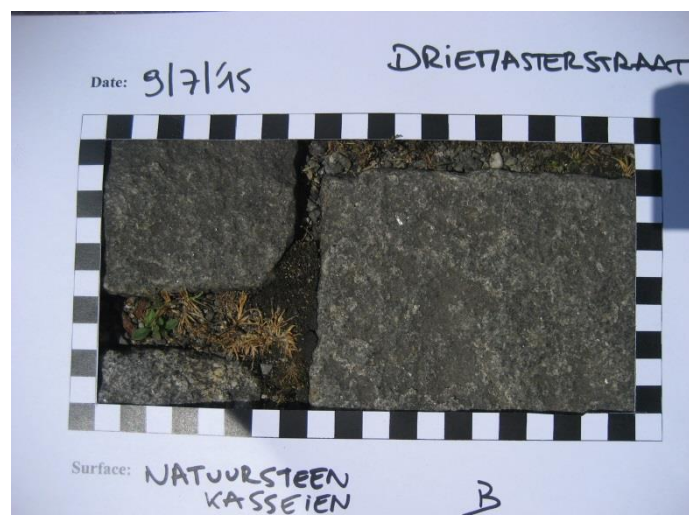


Figure 24 - Driemasterstraat, Gand (pavés en pierre naturelle, B).



Figure 25 - Koningsdonkstraat, Gand (pavés en pierre naturelle, D).

7.2. Caractéristiques du revêtement dont l'influence est déterminante pour la production du bruit

7.2.1. Irrégularités du revêtement routier

TEXTURE ET SPECTRE DE TEXTURE^{viii}

Au départ, les irrégularités du revêtement routier ont été réparties en trois classes: microtexture, macrotexture et défauts de planéité. Lorsque les mécanismes à l'origine des bruits de roulement ont été connus, on a ajouté une quatrième classe : la mégatexture, qui se situe entre la macrotexture et les défauts de planéité (voir également la fiche 5). Les limites des quatre classes figurent à la Figure 26.

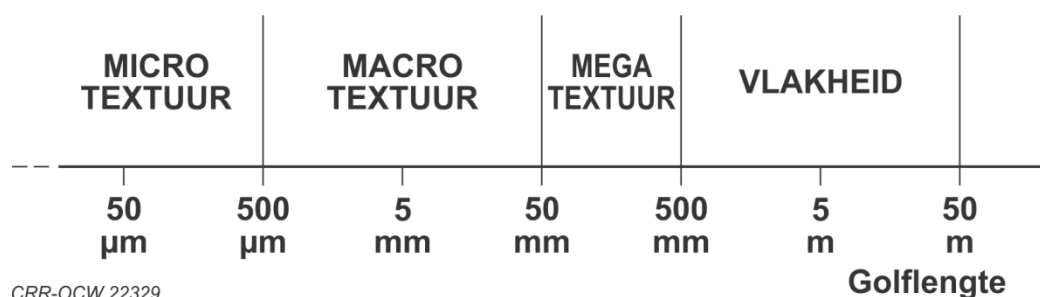


Figure 26 - les quatre classes de texture et leurs limites.

D'une façon analogue à l'analyse fréquentielle d'un signal temporel (la pression acoustique, par exemple), il est possible de réaliser l'analyse spectrale d'un revêtement routier donné (voir Figure 27) et d'en déterminer ainsi le spectre de texture ou de profil.

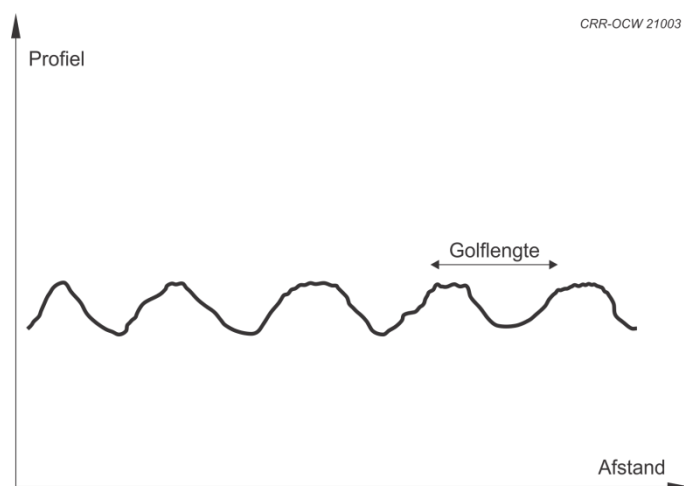


Figure 27 - exemple d'un profil de texture.

La fréquence spatiale (exprimée en m^{-1}) se situe le long de l'axe horizontal, tandis que le niveau de profil ou de texture L_x (exprimé en dB) est placé le long de l'axe vertical.

Le niveau de texture est indiqué par la formule:

$$L_{Tx} = 20 \log (a_x/a_{ref}) \quad (\text{équation 1})$$

où:

λ_x est un indice d'une longueur d'onde de texture ou d'une bande de longueurs d'onde de texture (voir ci-dessous).

L_{Tx} est le niveau de texture ou de profil (par rapport à 10^{-6} m)

a_x est la valeur quadratique moyenne du profil en m

a_{ref} est une valeur de référence pour le profil de la valeur quadratique moyenne (m), fixée par convention à 10^{-6} m.

De manière tout à fait comparable à un spectre sonore, les contributions des différentes fréquences spatiales adjacentes sont regroupées en bandes d'octave ou de tiers d'octave. La Figure 28 donne un exemple de spectre de texture. Les niveaux de macrotexture se situent généralement entre 20 et 80 dB, ce qui représente une échelle pratique à utiliser.

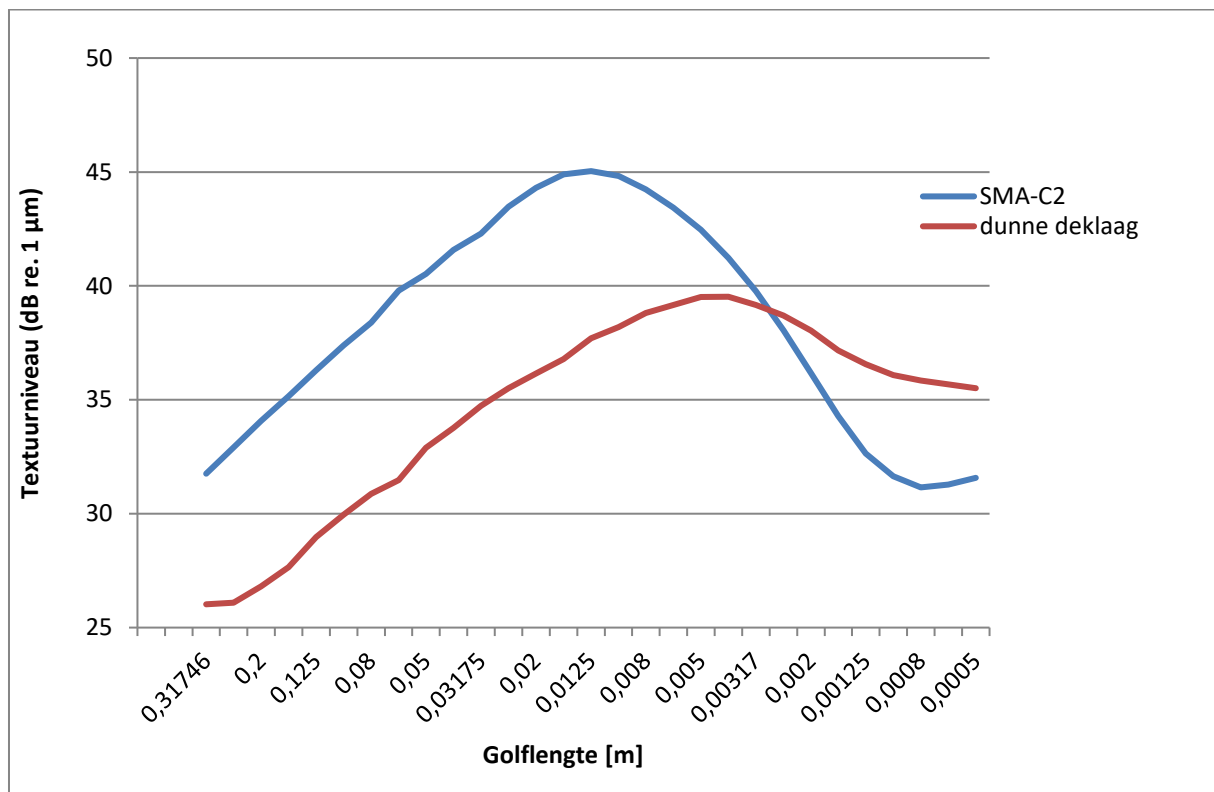


Figure 28 - spectres de texture du SMA et d'une couche mince.

Les spectres de texture sont mesurés à l'aide d'un profilomètre. Plusieurs principes peuvent être appliqués. Dans le cas d'un profilomètre laser, on fait glisser un rayon laser sur la surface à échantillonner et l'on regarde le point laser sous un certain angle à l'aide d'une caméra. Il est possible de reconstruire le profil du revêtement (Figure 29) en fonction de l'angle selon lequel la caméra "voit" le point. La Figure 30 représente le profilomètre laser du Centre de recherches routières (CRR). La norme ISO correspondante (ISO 13473-2 et 3) fournit des informations plus détaillées sur les profilomètres.

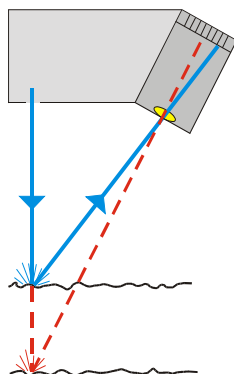


Figure 29 - représentation schématique du fonctionnement d'un profilomètre laser.



Figure 30 - profilomètre laser du CRR.

INFLUENCE DE LA TEXTURE SUR LA PRODUCTION DE BRUIT

On peut affirmer que la microtexture et les défauts de planéité n'ont, a priori, aucune influence sur la production de bruits de roulement. Les défauts de planéité peuvent toutefois secouer les chargements ou les conteneurs des poids lourds. Ils peuvent en outre provoquer des vibrations lors du passage de véhicules lourds, ce qui peut générer un bruit secondaire pour les habitations avoisinantes, à cause de la diffusion de vibrations au niveau des murs, des sols, etc.

Au début des années quatre-vingt^{ix}, on a établi une corrélation entre le spectre du bruit de roulement et le spectre du profil du revêtement routier (voir Figure 31). Deux domaines de corrélation très importants ont été découverts: les sons à basses fréquences (< 1 kHz) présentent une corrélation positive avec les grandes longueurs d'onde de texture (> 10 mm). Les hautes fréquences du spectre du bruit de roulement ont par contre une corrélation négative avec les courtes longueurs d'onde de texture. Des corrélations similaires ont par ailleurs été mises en évidence entre le spectre du bruit de roulement et le spectre du profil des pneus.

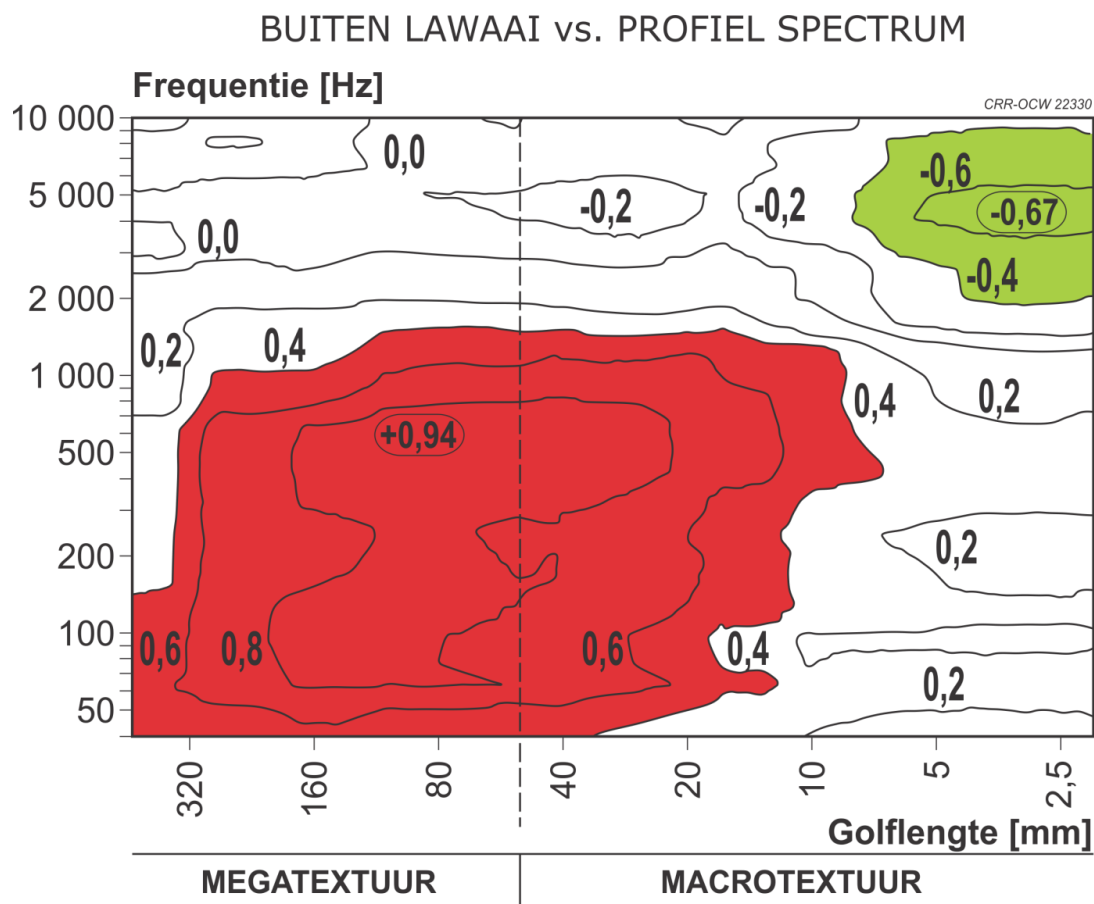


Figure 31 - coefficients de corrélation entre les longueurs d'onde de texture et les fréquences du bruit de roulement.

Lorsque les points (longueur d'onde de texture, niveau sonore) sont définis pour la corrélation positive ou négative maximale et reportés dans un graphique, un lien linéaire apparaît – comme exposé dans Figure 32 et Figure 33.

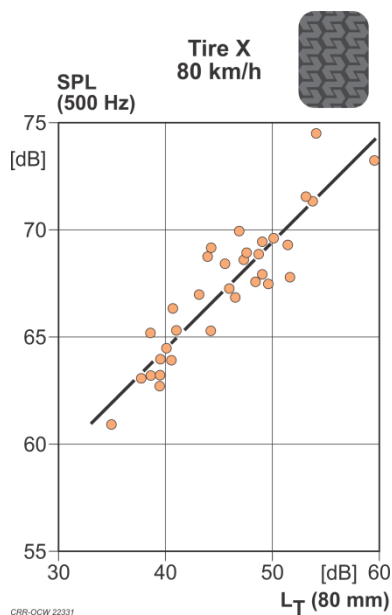


Figure 32 - corrélation positive entre la mégatexture à 80 mm et le bruit de roulement à 500 Hz.

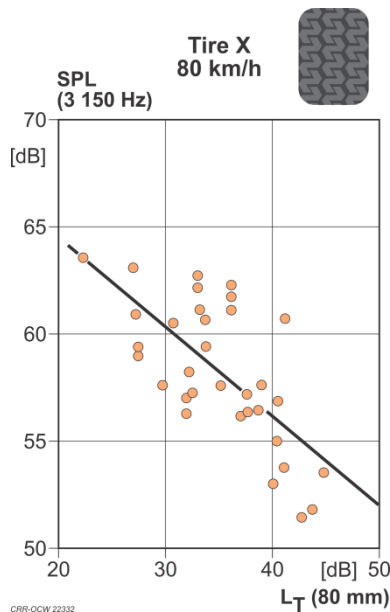


Figure 33 - corrélation négative entre la macrotexture à 5 mm et le bruit de roulement à 3150 Hz.

L'influence à la fois favorable et défavorable (selon la longueur d'onde de texture) de la texture sur le niveau sonore du bruit de roulement démontre que l'on ne peut jamais employer de méthodes d'essai fournissant un seul chiffre de mesure de la texture lorsqu'il faut évaluer la production de bruit d'un revêtement donné.

Attendu que les maximums de corrélation positive et négative sont toujours proches des longueurs d'onde de texture égales à 80 mm et 5 mm respectivement, il est possible de prévoir le niveau sonore d'un revêtement donné en s'appuyant sur les niveaux de texture mesurés pour ces deux longueurs d'onde de texture LT80 et LT5. La formule suivante a été proposée pour le "Estimated Road Noisiness Level" (ERNL^x):

$$\text{ERNL} = 60 + 0,39 \text{ LT80} - 0,13 \text{ LT5} \quad (\text{équation 2})$$

Cette grandeur est exprimée en dB(A). 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 CPB (voir plus loin). La formule traduit de manière simple le fait que plus un revêtement routier présente une forte mégatexture, plus il est bruyant. C'est précisément l'inverse pour la macrotexture: plus la macrotexture est importante, plus le revêtement est silencieux. On constate que dans la formule, le coefficient précédant le terme de la mégatexture est trois fois supérieur à celui du terme de la macrotexture. La capacité de la mégatexture à générer du bruit est donc largement supérieure à la capacité de la macrotexture à annuler ce bruit. Il convient dès lors d'éviter autant que possible la présence d'une mégatexture lors de la construction et de l'entretien des routes. Il est bon de noter qu'il ne tient pas compte de l'absorption et qu'il ne peut donc être utilisé que pour les revêtements fermés. Il est évident que l'ERNL n'est qu'une estimation approximative.

De nombreuses tentatives ont déjà été entreprises pour modéliser de manière plus précise la production du bruit^{xi}. Jusqu'à présent, celles-ci n'ont pas vraiment été couronnées de succès. Les validations des modèles les plus avancés indiquent des différences de plusieurs dB(A) entre les niveaux sonores prévus et ceux mesurés, ce qui n'est pas suffisamment bon pour être utilisable^{xii}.

LA MEGATEXTURE DANS LA PRATIQUE

Comment se présente une mégatexture dans la pratique?

- Une mégatexture peut être un défaut résultant d'une erreur commise lors de la pose du revêtement routier. Il peut par exemple s'agir des ondulations parfois observées à la surface d'un revêtement en béton (Figure 34). Lors de la mise en œuvre mécanique du béton à l'aide d'une machine à coffrages glissants, il est possible que des ondulations longitudinales apparaissent à la surface. L'ampleur de ces ondulations dépend notamment de la manière dont le béton est compacté par la machine à coffrages glissants et placé dans le revêtement, par la vitesse à laquelle progresse la machine, ainsi que par son poids et sa flexibilité. Les vitesses trop élevées sont déconseillées, a fortiori pour les pistes cyclables plus étroites. Outre une machine et une vitesse adaptées, il est aussi recommandé d'utiliser un supersmoother (voir Figure 35). Celui-ci consiste en une poutre longitudinale qui est montée à l'arrière de la machine et qui effectue un mouvement de va-et-vient dans le sens longitudinal et un déplacement dans le sens transversal. Le supersmoother doit être suivi par une table flottante, afin d'effacer les lignes de mortier apparues suite au passage de la poutre. Lors de la prescription de revêtements en béton, il est important de suivre les cahiers des charges types étant donné qu'ils fixent des exigences pour éviter les ondulations trop importantes. Les exigences ont maintenant été élargies aux pistes cyclables séparées. Les mesures sont réalisées avec un APL (analyseur de profil en long) adaptée.



Figure 34 - ondulations indésirables dans la surface d'un béton dans le domaine de mégatexture suite à l'utilisation d'une poutre transversale lors de la mise en œuvre.



Figure 35 - un "supersmoother" effectue des mouvements transversaux et circulaires pour éviter les inégalités.

- Une mégatexture peut également apparaître au fil du temps, à la suite de l'usure ou de signes de fatigue de la couche supérieure du revêtement routier (Figure 36). Des réparations temporaires, avec de l'asphalte coulé, par exemple, peuvent aggraver la mégatexture.



Figure 36 - mégatexture suite à des fissures de fatigue dans l'enrobé.

- Une macrotexture non homogène peut aussi être à l'origine d'une mégatexture. Il peut par exemple s'agir de la répartition irrégulière de gros agrégats à la surface d'un revêtement asphalté (Figure 37).



Figure 37 - mégatexture due à une macrotexture non homogène: répartition irrégulière d'agrégats à la surface d'un revêtement bitumineux clouté.

- Certains types de revêtements présentent une mégatexture intrinsèque, souvent combinée à une macrotexture peu marquée - voire inexistante. Les pavés de béton font partie des revêtements dotés d'une mégatexture intrinsèque et d'une macrotexture réduite (Figure 38). 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.

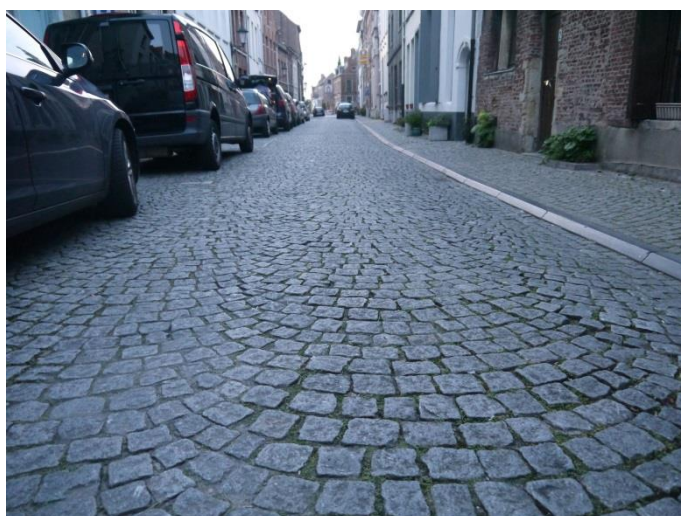


Figure 38 - mégatexture intrinsèque d'un revêtement en pavés.

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): brossage, passage d'une toile de jute ou peignage du béton frais, rainurage ou meulage du béton durci, ou encore impression d'un motif immédiatement après la pose du béton ou de l'asphalte, ...

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, voir Figure 39). Ce bruit “plaintif” caractéristique est extrêmement gênant. Pour exprimer la gêne liée à celui-ci on décrit l’ambiance sonore avec un indicateur de bruit qui est majoré de quelques dB(A) par rapport à celui qui est réellement mesuré. Le même phénomène se produit sur un pavage en béton lorsque les joints sont orientés perpendiculairement au sens de circulation (Figure 40). L'une des solutions envisageables consiste à poser les pavés en chevrons (Figure 41 et Figure 42). La Figure 43 donne une représentation schématique des appareils les plus courants.

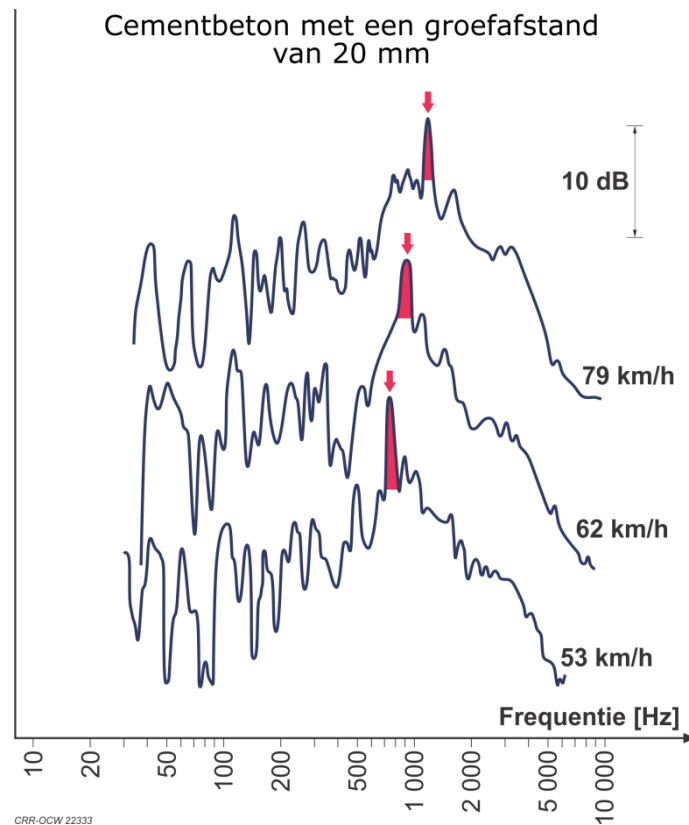


Figure 39 - spectre de bruit de roulement avec composants tonneaux liés à la vitesse, sur un revêtement en béton strié transversalement.



Figure 40 - revêtement en béton strié transversalement.

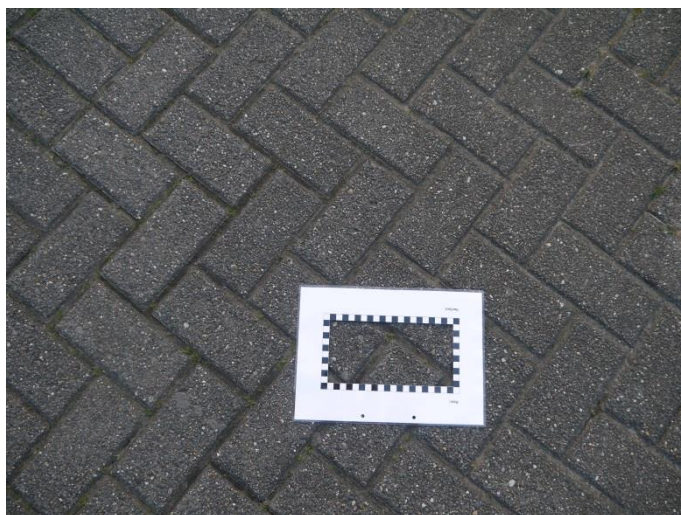


Figure 41 - appareil en arêtes de poisson.



Figure 42 - appareil à bâtons rompus.

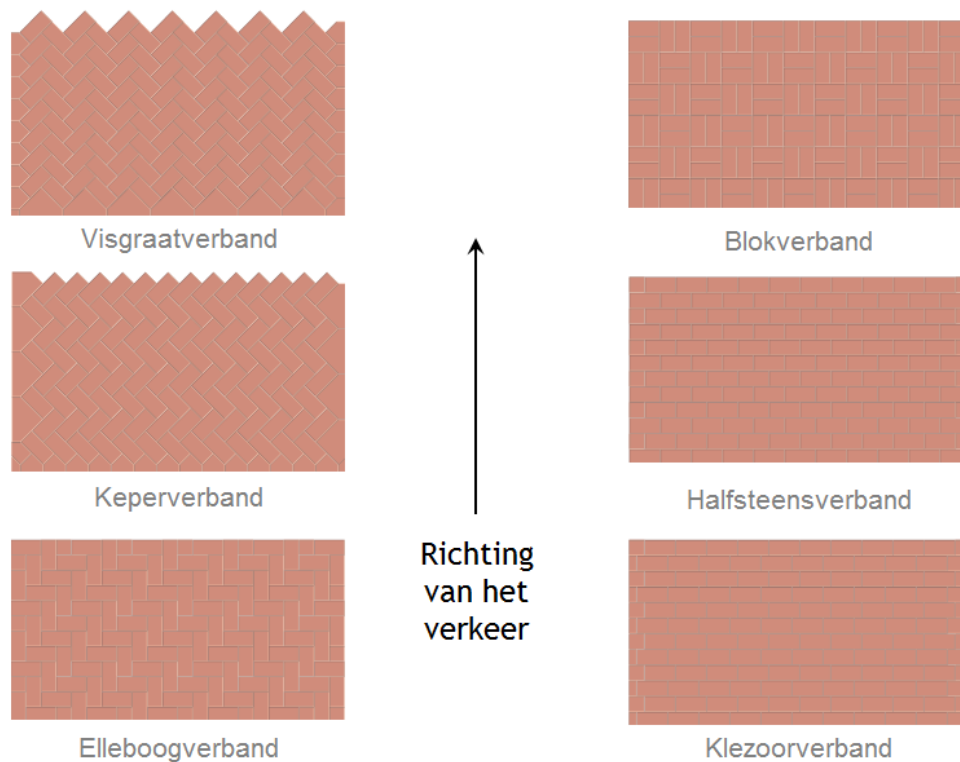


Figure 43 - appareils les plus courants.

L'effet de pompage d'air est renforcé lorsque les petits creux présents à la surface (également appelés poches d'air) sont temporairement obstrués lors du passage d'un pneu. Normalement, ce phénomène se produit uniquement dans les creux du profil du pneu. Un revêtement routier comportant des poches d'air est extrêmement bruyant, mais le spectre de texture ne permet pas de le prévoir.

En l'absence d'autres irrégularités, c'est la dimension des plus gros gravillons présents en surface qui a un impact déterminant sur le bruit de roulement. On peut toutefois créer des textures très différentes avec des gros gravillons de granulométrie identique. Comme mentionné précédemment, une mégatexture peut provenir de la répartition irrégulière des gravillons à la surface ou du détachement d'une partie de ces gravillons à cause de l'usure.

7.2.2. Absorption du son

La Figure 44 illustre l'évolution type du coefficient d'absorption acoustique en fonction de la fréquence. Elle représente les courbes d'absorption acoustique d'un AC et d'un PA. Les variables technologiques jugées importantes pour les propriétés absorbantes d'un revêtement routier sont les suivantes^{xiii}:

- épaisseur du revêtement routier
- pourcentage de creux
- répartition des dimensions des gravillons, du sable et du fillers
- type et quantité du liant

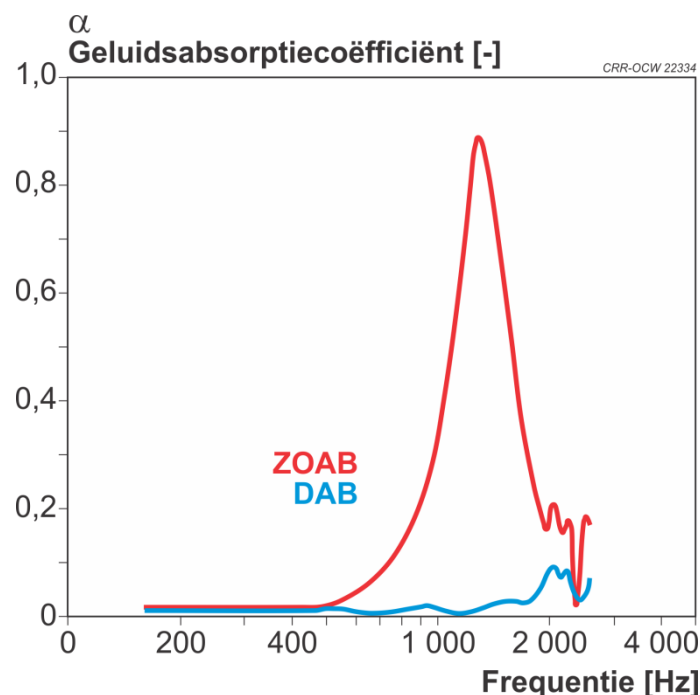


Figure 44 - courbes d'absorption typiques d'un AC et d'un PA.

Plus le coefficient d'absorption est proche de 1, plus la capacité d'absorption du son du revêtement dans ce domaine de fréquences est élevée. La position horizontale, la hauteur et la largeur du premier pic d'absorption sont importantes pour la capacité d'absorption. La position du pic est liée à l'épaisseur de la couche poreuse. La hauteur et la largeur du pic sont liées à la granularité et au pourcentage de vides.

L'absorption acoustique est une des explications justifiant les bons résultats du béton bitumineux drainant sur le plan acoustique. D'autres explications possibles incluent la réduction de l'effet de pompage d'air, la diminution des vibrations des pneus grâce à la 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 poreux. Les efforts déployés en la matière visent une absorption maximale dans les sections pertinentes du spectre.

La courbe d'absorption du PA illustrée dans la Figure 45 montre la succession de pics et de creux d'absorption propre à un matériau granulaire. Lors de l'optimisation, on tente "d'adapter" le premier pic d'absorption à l'endroit voulu du spectre. Il s'agit souvent de la gamme des basses fréquences du spectre sonore du véhicule (autour de 500 Hz). On tente bien entendu d'obtenir un pic d'absorption le plus haut et le plus large possible.

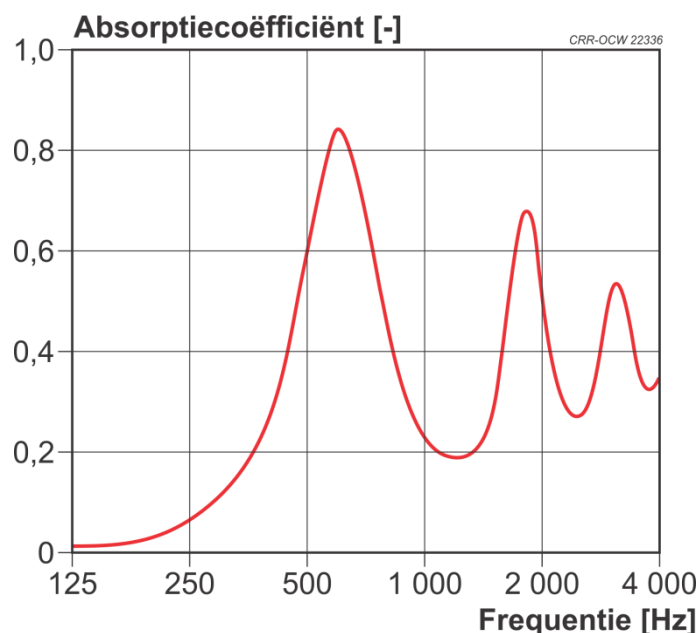


Figure 45 - pics et creux dans la courbe d'absorption d'un PA.

Pour optimiser le PA, il est recommandé d'utiliser des gravillons de granulométrie plus réduite, ce qui rend le revêtement moins perméable et, à terme, moins sensible à l'obstruction des creux. C'est pour résoudre ce problème que l'on a conçu le PA bicouche, dont les deux couches sont composées de gravillons de dimensions différentes. Le PA bicouche a été utilisé avec succès entre-temps.

La comparaison des spectres acoustiques de véhicules roulant à 120 km/heure sur différents types de revêtements routiers (AC 0/16 mm, PA monocouche 6/16 et 4/8 et PA bicouche 4/8 sur 6/16) démontre que les PA offrent tous deux une réduction pratiquement constante dans la gamme des hautes fréquences (630-4000 Hz) par rapport à l'AC, pour lequel on enregistre une légère baisse aux alentours de 1250-2000 Hz, qui s'explique sans doute par la présence du pic d'absorption primaire à cet endroit. Les deux types de revêtements présentent une production de bruit plus importante dans la gamme des basses fréquences (pic 600-800 Hz), à cause de la mégatexture accrue par rapport à l'AC. En ce qui concerne le PA bicouche, le bruit additionnel dû à la mégatexture est annulé efficacement par le pic d'absorption primaire, qui se situe à une fréquence plus basse que dans le cas du PA monocouche.

Autrement dit, l'absorption joue seulement 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 PA peut être imputée à l'absence de pompage d'air par les pneus. Sur un revêtement poreux, l'air peut en effet se faufiler verticalement à travers les creux sans être comprimé et sans s'échapper de nouveau (bruyamment). Sur un revêtement non poreux, 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.

Aux Pays-Bas, le PA est appliqué de manière généralisée sur les autoroutes. Lorsqu'une réduction acoustique supplémentaire est nécessaire, on applique un PA bicouche. Le PA est adapté pour les routes à vitesse plus élevée. Un effet auto-nettoyant se produit sous l'effet des véhicules roulant à grande vitesse par temps de pluie, ce qui ralentit le colmatage des vides et donc la diminution de la réduction sonore qui en découle. Un autre avantage de ce revêtement est la diminution des projections d'eau et l'amélioration de la visibilité par temps de pluie.

Un autre type de revêtement parfois utilisé pour l'absorption acoustique sont les revêtements minces ouverts.

Pour de plus amples informations, voir p. ex. ^{xiv}

7.2.3. Impédance mécanique du revêtement

On a avancé l'idée que l'impédance mécanique (liée à la rigidité) de la route pouvait aussi influencer le niveau de bruit produit par un revêtement. L'impédance est définie comme le rapport entre la force exercée et la vitesse du déplacement.

Des essais ont été réalisés avec plusieurs sortes de bétons bitumineux expérimentaux, en remplaçant une partie des gravillons par des billes de caoutchouc ou bien en ajoutant de la poudre de caoutchouc au mélange. Ceux-ci n'ont mis en avant que des réductions sonores de 1 à 2 dB(A) tout au plus.

Dans le cadre d'une étude^{xv} sur le site expérimental de Sperenberg en Allemagne, deux surfaces de même texture et d'impédances mécaniques différentes ont été construites: papier de verre collé sur un béton bitumineux et sur une couche élastique. Des mesures acoustiques "coast by" ont été réalisées à des vitesses différentes et avec différents pneus. Dans le graphique des spectres sonores moyens (voir Figure 46), on constate une différence nette entre 630 et 1600 Hz. Cette réduction sonore est clairement causée par l'élasticité^{xvi}.

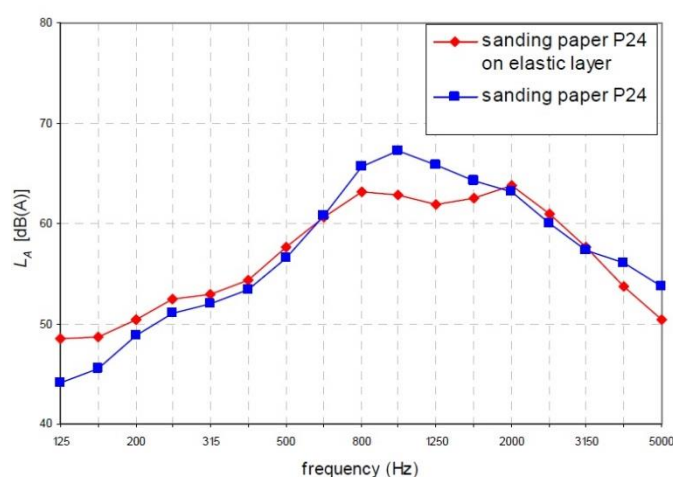


Figure 46 - Impact de l'élasticité sur le bruit de roulement.

Sur les revêtements dont le composant principal est le caoutchouc, comme les revêtements poroélastiques, on a aussi observé une importante diminution du bruit. Le CRR dirige un projet de recherche européen, baptisé PERSUADE^{xvii}, et qui a pour objectif de développer un revêtement poroélastique. Ce revêtement expérimental est constitué de billes de caoutchouc et de gravillons, liés avec une résine synthétique élastique. De précédents essais, réalisés surtout en Suède et au Japon, ont démontré qu'il était possible d'obtenir des réductions sonores extrêmement importantes, de l'ordre de 10 dB(A). Cette étude de consacre au développement d'un type de revêtement qui soit suffisamment durable et sûr. Dans le cadre de ce projet, des sections expérimentales ont été réalisées au Danemark, en Suède, en Slovénie et en Belgique. Une réduction sonore de 8 tot 10 dB(A) par rapport à l'AC y a été mesurée. Ces sections font l'objet d'un suivi afin de récolter de plus amples informations sur leur durabilité. Etant donné qu'ils sont bien plus onéreux que les revêtements traditionnels, ils devraient plutôt être utilisés comme alternative aux écrans antibruit, là où les nuisances sonores sont importantes, à condition que leur durabilité ait suffisamment été améliorée.

L'utilisation de ce type de revêtement pourrait contribuer de manière significative à l'amélioration du climat acoustique des villes de demain.

Il n'existe encore aucune norme décrivant une méthode de mesure de l'impédance mécanique, mais il existe par contre différents dispositifs de mesure sur le marché, tant statiques que dynamiques. Le plus simple consiste à exercer à l'aide d'un marteau un impact sur le revêtement, tandis qu'une tête d'impédance mesure la force au point d'impact et qu'un accéléromètre enregistre à distance la vibration.

7.2.4. Revêtement mouillé

La présence d'eau sur le revêtement peut avoir une influence considérable sur la production de bruit.

Il ressort d'une étude 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 a constaté une modification des caractéristiques d'absorption sur revêtement poreux. Le pic d'absorption se déplace vers les basses fréquences et est moins élevé lorsque la quantité d'eau présente dans les creux augmente.

Le CRR 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 du PA, l'eau n'entraîne apparemment guère d'augmentation du niveau sonore. On observe le phénomène inverse dans le cas de l'AC, qui génère un niveau de bruit sensiblement accru. Par temps de pluie, l'AC devient en effet aussi bruyant que le béton strié, extrêmement bruyant (même par temps sec).

Sandberg et Ejsmont^{xviii} fournissent des valeurs approximatives reflétant l'influence de l'humidité sur l'AC, en fonction de la quantité d'eau présente sur le revêtement et de la vitesse du véhicule (Tableau 1).

Tableau 1 :

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)

Voir également ^{xix}

7.2.5. Irrégularités dues aux “éléments étrangers” dans le revêtement

COUVERCLES DE BOUCHES D’EGOUT

Il n'est pas rare que des éléments “étrangers” au revêtement – des couvercles de bouches d'égout et assimilés – constituent un défaut de planéité local (Figure 47) et, par conséquent, une source de bruit. Il convient d'y prêter l'attention nécessaire lors de la pose de la couche supérieure, afin que la surface supérieure de ces éléments soit parfaitement plane par rapport au reste du revêtement. Dans le cadre du projet SILENCE, des mesures ont été réalisées sur différents couvercles^{xx}. L'augmentation acoustique mesurée à des vitesses allant jusqu'à 60 km/h était de 1 à 5 dB(A). La préférence doit être donnée à des couvercles de texture fine (voir Figure 48). Les couvercles mal intégrés doivent à tout prix être évités.



Figure 47 - mégatexture due à un couvercle mal intégré et présentant une texture défavorable.



Figure 48 - couvercle de texture fine, sans inégalité.

GRILLE DE VENTILATION

Une grille d'aération, de métro, par exemple, est un autre exemple d'élément étranger. Ce genre de grille présente souvent une structure régulière, qui produit un son “chantant” gênant lorsque des véhicules roulent dessus - à l'instar du béton strié. Il est conseillé de prendre les précautions requises lors de l'installation de ces grilles, afin d'éviter des nuisances excessives pour les riverains.

VOIES DE TRAM

Les voies de trams au niveau des carrefours peuvent aussi représenter une source de bruit supplémentaire. La meilleure manière de l'éviter est de les placer à un angle de 45° par rapport au sens de la circulation. L'augmentation du bruit peut aller jusqu'à 10 dB(A) à 70 km/h lorsque les rails sont perpendiculaires à la circulation. Aux vitesses urbaines caractéristiques de 30 à 60 km/h, des augmentations de 2 à 9 dB(A) ont été mesurées lors du projet SILENCE^{xxi}. Il existe néanmoins sur le marché toutes sortes de systèmes pour atténuer le bruit et les vibrations au niveau des voies de trams (déjà utilisés par la STIB -MIVB). La différence de production sonore entre un revêtement mal fini ou usé et un bon raccordement entre le revêtement et les rails grâce à un joint en caoutchouc peut aller de 2 à 4 dB(A) (voir Figure 49 et Figure 50).



Figure 49 - voies de tram mal intégrées.



Figure 50 - voies de tram bien intégrées avec joint en caoutchouc.

RALENTISSEURS

Les ralentisseurs génèrent un surplus de bruit. Lorsqu'ils sont raides ou que leur texture est grossière, l'augmentation peut aller jusqu'à 8 à 10 dB(A). A l'inverse, s'il n'est pas trop raide et qu'il présente une bonne texture, le bruit n'augmente que de 1 dB(A) environ à des vitesses inférieures à 40 km/h et de 2 à 3 dB(A) à des vitesses supérieures à 40 km/h.

Lorsque les ralentisseurs ont été construits sans respecter les prescriptions (ils ne sont p. ex. pas assez hauts), il est possible qu'ils ne remplissent pas leur rôle. En outre, les ralentisseurs et les coussins berlinois peuvent provoquer des vibrations gênantes pour les riverains (p. ex. côté trop élevé, ce qui provoque un impact plus important lors de leur franchissement ou côté pas assez haut, ce qui fait que le trafic n'est pas ralenti et que l'impact est de nouveau plus grand). Il s'agit d'une question très délicate.

Les mesures visant à ralentir la vitesse doivent toujours faire l'objet d'un choix bien réfléchi, qui tient compte du type de trafic en présence (p. ex. voitures particulières, poids lourds, bus, etc.).

7.3. Phénomènes physiques impliqués dans la production de bruit de roulement^{xxii}

Les différents phénomènes physiques qui génèrent du bruit et/ou le renforcent lorsqu'un pneu roule sur un revêtement ont déjà été évoqués dans la fiche 4. Ils sont de nouveau décrits brièvement ci-dessous.

7.3.1. Vibrations des pneus

Les vibrations des pneus génèrent du bruit dans la gamme des basses fréquences (500 à 1000 Hz) et sont dues à des irrégularités du revêtement dont les longueurs d'onde sont comparables aux dimensions de la zone de contact pneu-revêtement (50-100 mm). Ces longueurs d'onde se situent dans la gamme de la mégatexture définie précédemment. Plus l'amplitude de la mégatexture est grande, plus le niveau de bruit produit est élevé.

Il importe de souligner que les vibrations des pneus font vibrer les parois et le volume d'air de l'habitacle du véhicule via la suspension. Le bruit perçu à l'intérieur de la voiture est largement déterminé par la présence d'une mégatexture sur le revêtement routier.

Une mégatexture réduite est l'un des éléments qui explique pourquoi le fait de rouler sur du PA, par exemple, produit relativement peu de bruit. Lors de la pose, lorsque l'enrobé bitumineux est encore chaud, il est relativement aisé de déplacer les gravillons. Si l'on passe un rouleau sur la surface chaude, les gravillons se positionnent à la surface avec la face la plus lisse vers le haut, ce qui donne une surface plane présentant une mégatexture réduite.

7.3.2. Pompage d'air

L'interaction entre la bande de roulement du pneu et le revêtement routier inclut un certain nombre de phénomènes complexes, tels que la compression et l'échappement de l'air dans les creux du dessin des pneus. Il s'agit du "pompage d'air" évoqué précédemment. Ce phénomène provoque un bruit dont les fréquences varient entre 1000 et 1500 Hz. On peut le contrer en réalisant une macrotexture sur le revêtement (évacuation horizontale de l'air qui "risque" d'être comprimé) ou en posant un revêtement drainant (évacuation verticale de l'air, comme dans le cas du PA).

7.3.3. Adhérence-glissement et adhérence-décollement

Ces deux phénomènes produisent également du bruit dans la gamme des fréquences comprises entre 1000 et 1500 Hz. Ils se produisent à l'avant et à l'arrière de la surface de contact pneu-revêtement, là où les petits blocs du dessin des pneus se mettent à vibrer de façon tangentielle.

Le bruit du pompage d'air, les phénomènes d'adhérence-glissement et d'adhérence-décollement peuvent être perçus à l'intérieur du véhicule, mais ils n'ont pas d'effet significatif sur le niveau de bruit.

7.3.4. Effet de corne

L'amplitude et la directivité des sons à hautes fréquences sont influencées par des réflexions répétées dans le cône d'air (ou "corne") formé par le revêtement et la bande de roulement du pneu. Il est possible de contrer l'effet de corne en posant un revêtement doté de bonnes qualités d'absorption dans la gamme de fréquences pertinente.

7.3.5. Projection de gouttelettes d'eau

Sur un revêtement mouillé, un surcroît de bruit est produit dans la gamme des fréquences supérieures à 1000 Hz – l'augmentation du niveau de pression acoustique est toutefois indépendante de la quantité d'eau sur le revêtement. Le bruit additionnel est dû à la projection de gouttelettes (voir également “revêtement mouillé” au paragraphe 7.2.1.).

7.4. Méthodes pertinentes de mesure de bruit

Les nuisances sonores dues au trafic sont un problème complexe. Le niveau de bruit est influencé par deux facteurs importants (voir Fiche 4):

1. la puissance sonore des véhicules, de même que son spectre et sa directivité. Cette puissance est à son tour conditionnée par:

- le type de véhicule
- les conditions de roulage
- les caractéristiques de la route

2. la propagation de la source vers le récepteur

- la distance source – récepteur
- la présence d'obstacles
- la nature du terrain
- la présence de surfaces réfléchissantes
- les conditions météorologiques.

En ce qui concerne l'influence spécifique du revêtement sur les phénomènes décrits, il faut tenir compte des points suivants:

- corrélation entre mégatexture et bruit de roulement
- réduction du bruit de roulement en raison de l'absorption (diminution de l'effet de corne)
- réduction par absorption du niveau de bruit provenant d'autres sources sonores au niveau du véhicule (tuyau d'échappement, prise d'air,...)
- réflexions multiples du son entre le dessous du véhicule et le revêtement.

Plusieurs méthodes permettent de mesurer les éléments susmentionnés:

7.4.1. Mesure du son ambiant

On peut décider de réaliser des mesures sur le lieu d'immission pour évaluer les nuisances sonores qui peuvent effectivement affecter les riverains des voies de circulation. Nombre de pays appliquent leur propre méthode standard en ce qui concerne l'exécution de ces mesures^{xxiii}. L'utilisation de la grandeur $L_{Aeq,T}$ est toutefois largement répandue. La période de référence (période de jour, période de nuit, semaine,...) et le lieu de mesure (à l'intérieur, en façade, en plein air) varient cependant

d'une méthode à l'autre. Lorsque l'on effectue de telles mesures, il est capital d'appliquer une seule norme afin de pouvoir confronter les résultats des mesures à une valeur indicative/norme déterminée.

Le trafic routier est l'une des principales sources des nuisances sonores. La lutte contre le bruit routier est depuis longtemps déjà une priorité de l'Union européenne, et a entre autres résulté en la publication de la Directive européenne sur le bruit^{xxiv}. Celle-ci oblige les états membres à établir des cartes de bruit, entre autres pour les environs des axes importants de circulation et dans les grandes agglomérations. Pour traiter les nuisances sonores dans les zones problématiques, il faut également mettre sur pied des plans d'action. Cette directive définit des indicateurs de bruit. Ceux-ci doivent être utilisés pour les cartes de bruit et les plans d'action. Les deux principaux indicateurs sont:

1. L_{den} ; l'indicateur jour-soirée-nuit de bruit utilisé pour évaluer globalement la gêne
2. L_{night} : l'indicateur nuit de bruit utilisé pour évaluer les perturbations du sommeil la nuit

7.4.2. Mesure du niveau sonore global du véhicule

La méthode la plus fréquemment utilisée est celle décrite dans quelques normes ISO^{xxv}. Le paramètre d'évaluation et, par conséquent, le niveau sonore mesuré est le niveau sonore maximal L_{Amax} pondéré par A, qui est enregistré lors du passage d'un véhicule dans des conditions de roulage bien définies: il est mesuré sur des véhicules en accélération maximale et en respectant l'accélération prescrite en fonction du type de transmission et de véhicule. Cette norme ISO s'applique aux essais de véhicules motorisés au sein de l'U.E. et est à la base de normes similaires mises en oeuvre aux États-Unis et au Japon.

La philosophie de la norme ISO consiste à mesurer le niveau sonore du véhicule; c'est la raison pour laquelle on tente de minimiser la contribution des bruits de roulement. Il est recommandé de faire rouler le véhicule d'essai sur une bande dotée de caractéristiques bien définies (comme exposé au ^{xxvi}).

7.4.3. Mesure du niveau de bruit généré par un revêtement routier

STATISTICAL PASS-BY (SPB)^{xxvii}

Dans le cadre de cette méthode, le niveau de pression acoustique maximal pondéré par A (L_{Amax}) est mesuré lors du passage d'un véhicule devant le microphone. Ce microphone se trouve à 7,5 m de l'axe de la bande de circulation sur laquelle roule le véhicule et à une hauteur de 1,2 m (Figure 51). La Figure 52 présente l'évolution type du niveau de pression acoustique enregistré par le microphone.



Figure 51 - dispositif d'une mesure statistical pass by (SPB).

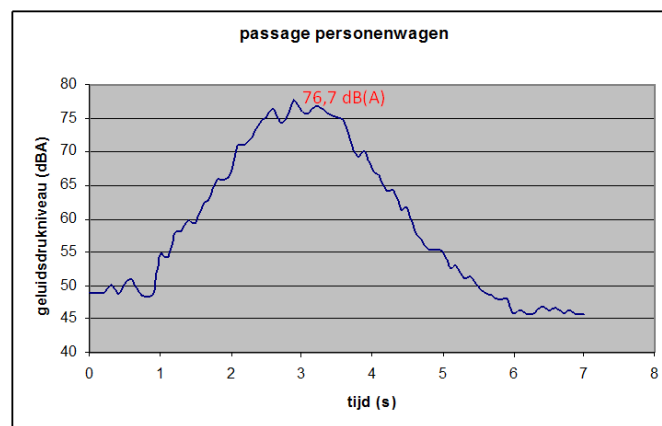


Figure 52 - déroulement typique du niveau sonore au passage d'une voiture.

On enregistre le passage aléatoire de plusieurs véhicules qui font partie d'un flux de trafic non entravé. La vitesse des véhicules échantillonnés est mesurée à l'aide d'un tachymètre radar. Un nombre suffisant de véhicules est échantillonné pour atteindre une précision statistique acceptable. Les couples mesurés ($\log(v_i), L_{Amax,i}$) sont mis en graphique (Figure 53). Une ligne de régression fournit ensuite la valeur L_{Amax} pour chaque vitesse.

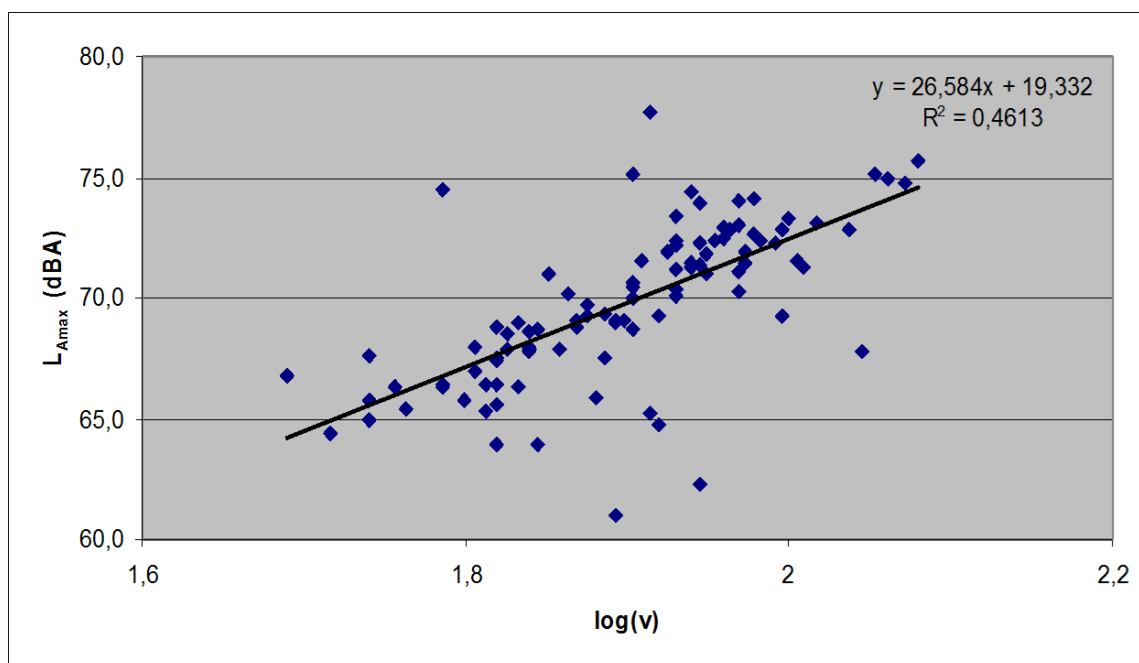


Figure 53 - niveau sonore maximal en fonction du logarithme de la vitesse.

Les véhicules sont répartis en trois catégories: voitures, véhicules à deux essieux et véhicules avec plus de deux essieux. Pour chacune de ces trois catégories, un nombre minimal de véhicules à échantillonner est prévu et un graphique $(\log(v_i), L_{Amax,i})$ est établi. On calcule ensuite une moyenne pondérée des trois valeurs L_{Amax} moyennes qui ont été obtenues à des vitesses de référence représentatives de la catégorie de véhicules sur la route étudiée (L_{veh}). De la sorte, on obtient une valeur SPBI globale pour la route. Ces valeurs SPBI peuvent ensuite être utilisées pour comparer la qualité acoustique de différents revêtements.

CONTROLLED PASS-BY (CPB)

La méthode CPB est une variante de la méthode SPB. On utilise un véhicule dont les caractéristiques sont connues et qui doit servir de véhicule de référence, d'où l'appellation "passage contrôlé". Les conditions d'essai peuvent varier considérablement en fonction du but des mesures. Le véhicule peut passer devant le microphone à vitesse constante et avec le moteur en fonctionnement (on parle de "cruising by" en anglais), mais le moteur peut aussi être coupé juste avant que le véhicule passe devant le microphone (il est alors question de "coasting by"). Dans ce dernier cas, seul le bruit de roulement est mesuré, alors que le premier cas mesure le niveau sonore global du véhicule. On peut aussi mouiller le revêtement pour étudier l'effet produit, p. ex. On peut sélectionner la vitesse du véhicule. Il faut bien entendu compenser les écarts de vitesse éventuels lorsque l'on compare les résultats des mesures CPB effectuées sur différents revêtements, à des vitesses différentes.

Plusieurs méthodes ont été présentées, mais aucune norme ISO ne définit la méthode CPB. Il faut donc faire montre de circonspection au moment de comparer les résultats obtenus à l'aide de cette méthode.

Les mesures relatives aux types de revêtements routiers dans la Région de Bruxelles-Capitale ont été réalisées à des vitesses de 30, 50 et 70 km/heure, dans le cadre de l'étude susmentionnée. La Figure 54 présente les résultats obtenus.

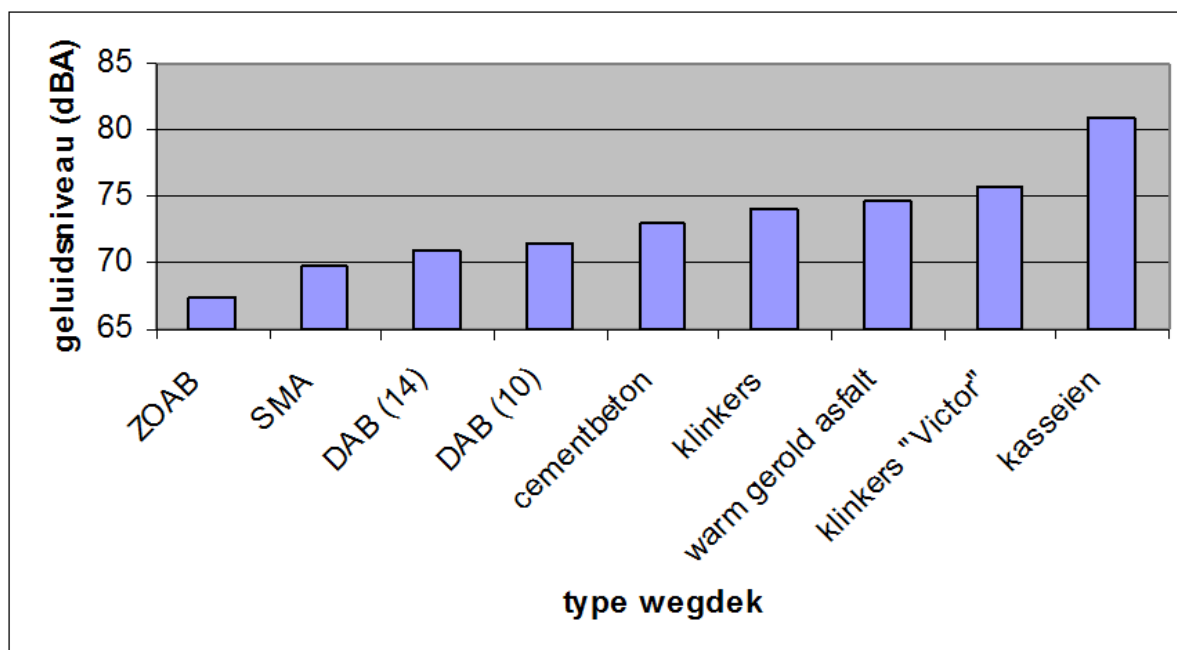
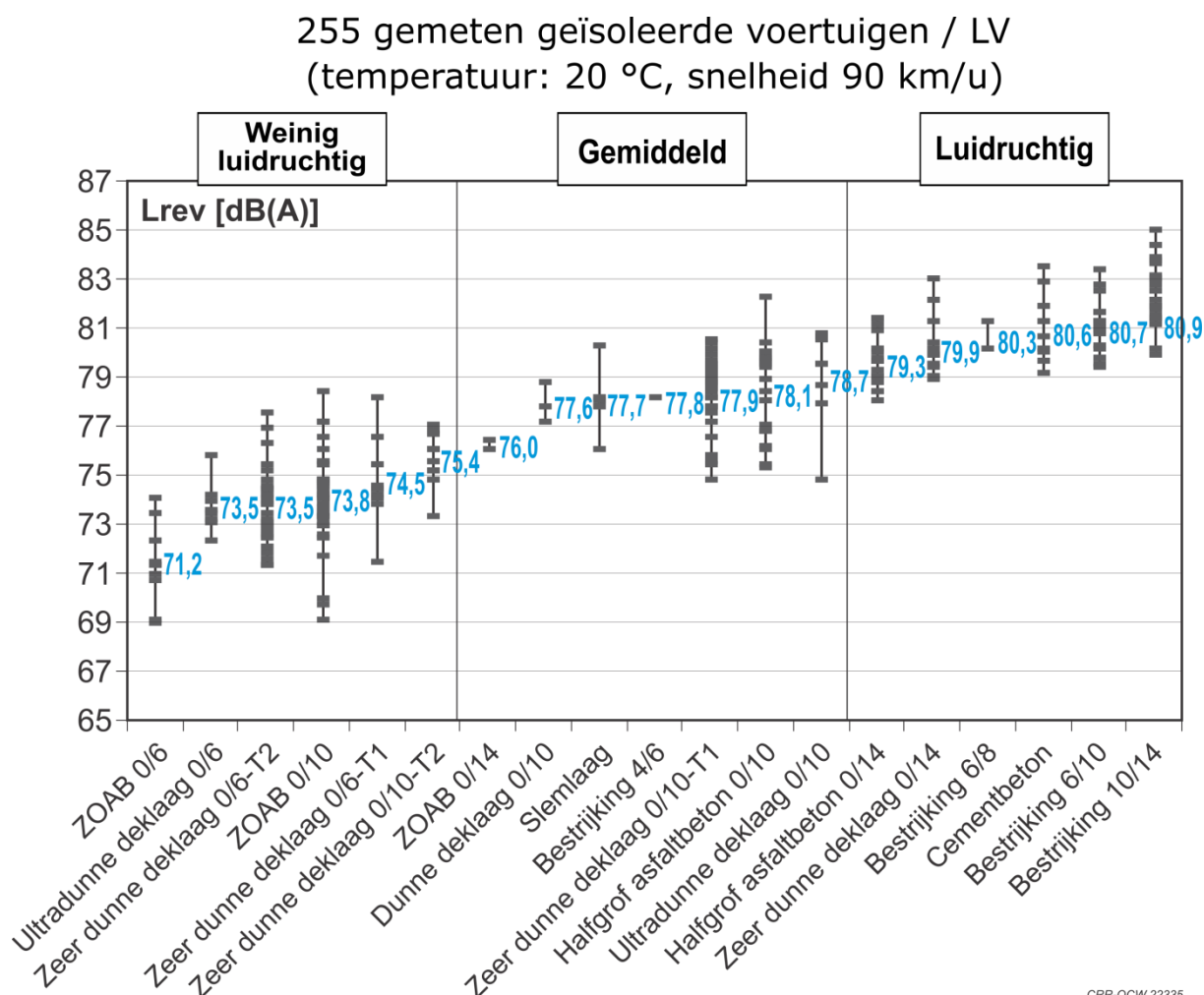


Figure 54 - résultats d'une campagne de mesure CPB sur quelques revêtements représentatifs à Bruxelles.

Les mesures démontrent clairement que les pavages (pavés en pierre naturelle ou béton) sont les revêtements les plus bruyants en raison de leur mégatexture extrêmement marquée, qui provoque de fortes vibrations des pneus. Il ne faut pas non plus négliger la mégatexture qui résulte de la répartition irrégulière des agrégats à la surface de l'asphalte clouté. C'est la raison pour laquelle l'asphalte clouté est presque aussi bruyant que les deux types de pavés en béton. Le béton de ciment et les différents types d'AC sont un peu moins bruyants, mais l'effet de pompage d'air est important vu leur manque de macrotexture. Le PA semble être le plus silencieux des revêtements étudiés dans la Région de Bruxelles-Capitale.

La Figure 55 indique les résultats de 255 mesures CPB réalisées avec des voitures roulant à une vitesse de 90 km/heure, sur tous les types de revêtements utilisés en France.

On constate que le PA de faible granulométrie (0/6 et 0/10) donne ici les meilleurs résultats, alors que le béton de ciment, le béton bitumineux et les bétons bitumineux minces de granulométrie élevée (0/14) apparaissent comme les revêtements les plus bruyants.



CRR-OCW 22335

Figure 55 - résultats de mesures CPB sur un grand nombre de revêtements en France.

BACKING BOARD (BB)

Un des problèmes rencontrés avec la méthode SPB est que les alentours de l'endroit de mesure doivent être dégagés de tout objet gênant (réfléchissant le bruit). La méthode backing board est en fait la méthode SPB, mais l'on place une plaque derrière le microphone (Figure 56). Les dimensions de la plaque et la position du microphone sont présentées à la Figure 57. Cette plaque permet d'éliminer l'impact du bruit provenant de l'arrière (comme les réflexions de bruit dues aux bâtiments). Le bruit provenant de l'avant est réfléchi de manière contrôlée par la plaque. Le niveau sonore mesuré monte de 6 dB(A) en raison du doublement de la pression acoustique. Un facteur de correction est donc appliqué sur le résultat de l'analyse. La méthode est décrite au^{xxviii}.



Figure 56 - backing board.

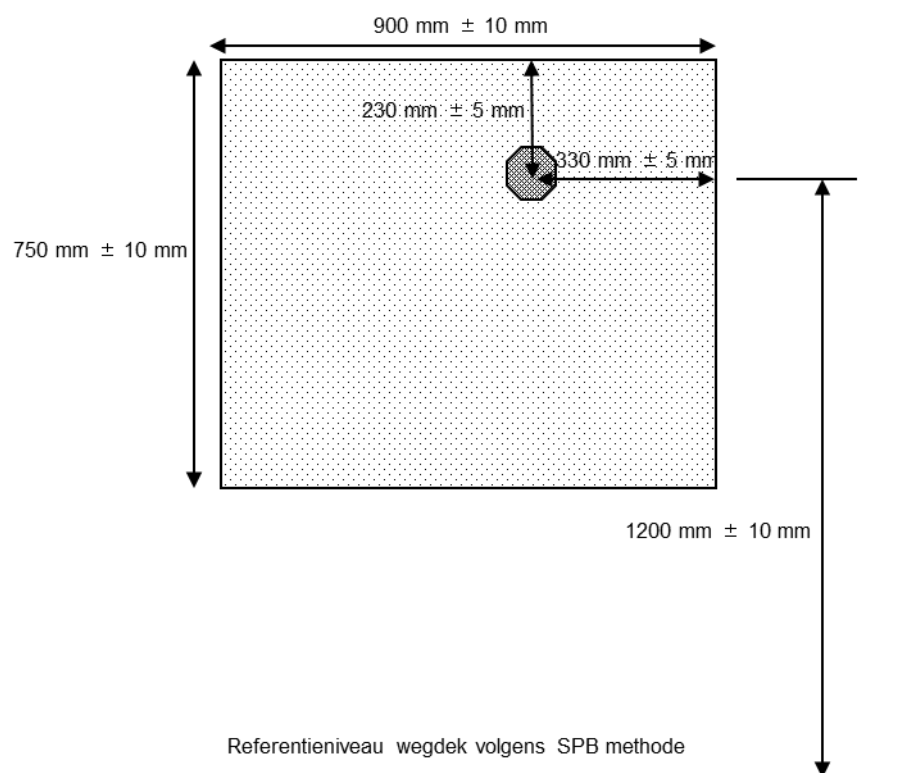


Figure 57 - dimensions prescrites pour une backing board.

CLOSE PROXIMITY (CPX)^{xxix}

Cette méthode requiert l'installation de microphones à proximité du pneu d'une roue que l'on fait rouler sur la surface d'essai. Contrairement aux méthodes décrites précédemment (CPB et SPB) où les mesures étaient prises "en champ lointain", ces mesures sont prises en "zone de son direct". La roue peut être intégrée dans une remorque spécialement conçue à cet effet (Figure 58) ou faire tout simplement partie du véhicule d'essai. Les microphones sont généralement placés à une vingtaine de centimètres du flanc du pneu (voir Figure 59).

Si l'on applique cette méthode, il faut impérativement veiller à ce que la mesure ne soit pas perturbée par le bruit provenant de turbulences d'air, de la remorque, du moteur ou du tuyau d'échappement du véhicule d'essai, etc.



Figure 58 - photo de l'extérieur de la remorque CRR CPX.



Figure 59 - photo de l'intérieur de la remorque CRR CPX.

Les spécifications relatives à cette méthode sont également définies dans une norme ISO, en particulier les emplacements des microphones. Ceux-ci semblent en effet avoir une grande influence sur les résultats de mesure.

Le revêtement à mesurer est parcourue avec la remorque CPX à une vitesse de référence de 50 ou de 80 km/h. Les mesures sont réalisées avec deux types de pneus de référence, le pneu P1 (SRTT) et le pneu H1 (AVON AV4), respectivement caractéristiques des pneus de voitures particulières et de poids lourds (voir Figure 60: à gauche H1; à droite P1). Une spécification technique relative à ces pneus de référence est en cours d'élaboration^{xxx}.



Figure 60 - pneus de mesure SRTT et Avon AV4.

Le résultat est le niveau sonore par 20 m de route et le spectre dans les pneus d'essai pour la totalité de la section mesurée. La méthode de mesure donne donc aussi une image de l'homogénéité du revêtement sur la longueur. La Figure 61 présente le résultat d'une mesure CPX effectuée sur un SMA-C de deux ans (granulométrie maximale de 10 mm) sur une longueur de 200 m, avec un pneu P1 à 80 km/h (nos remerciements à l'Agentschap Wegen & Verkeer).

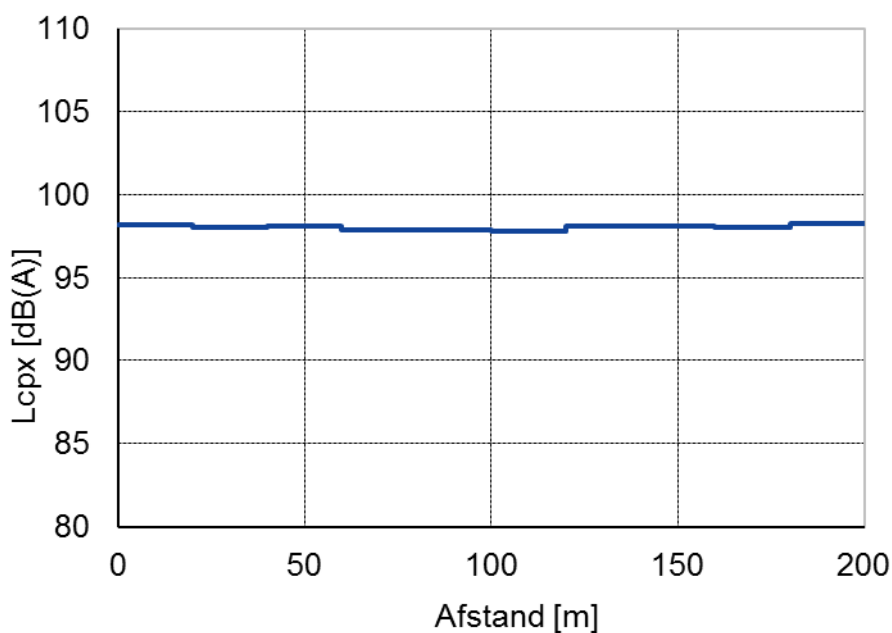


Figure 61 - niveau sonore CPX par 20 m.

Des résultats de mesure CPX sur quelques revêtements belges typiques sont donnés à la Figure 62. Il s'agit de mesures avec un pneu P1 à 80 km/h. Le nombre de mesures sur lequel la valeur moyenne est basée est donné entre parenthèses après la dénomination du revêtement. Les drapeaux d'erreur indiquent les niveaux sonores minimaux et maximaux mesurés au cours de la campagne. Il convient de noter qu'il y a une importante variation d'intensité sonore, p. ex. en cas de dénudage chimique de béton armé continu (BAC), de SMA et de PA. Ceci souligne que l'exécution est cruciale pour obtenir une qualité acoustique acceptable, ainsi que le fait que l'âge du revêtement a un impact important sur la qualité acoustique.

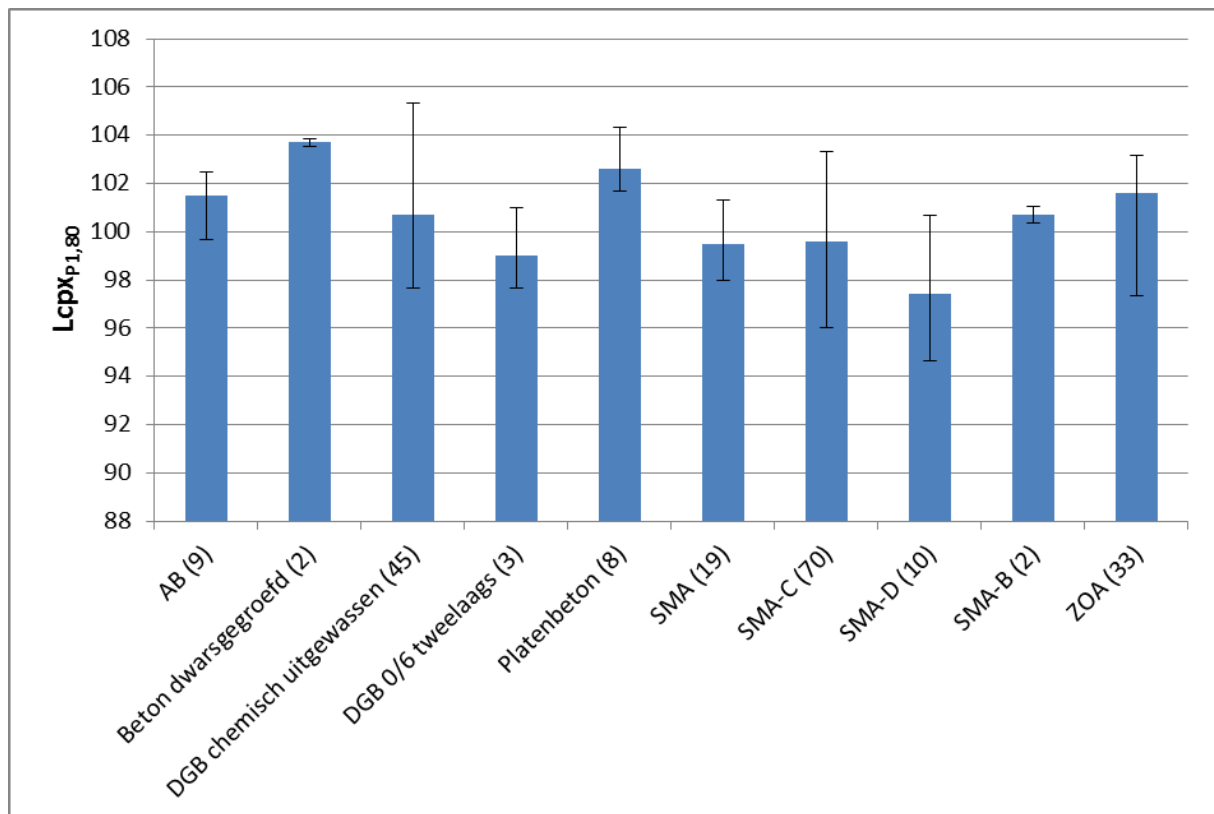


Figure 62 - résultats d'une campagne de mesure CPX sur quelques revêtements typiques en Région flamande.

On constate que les valeurs absolues des mesures CPX ne peuvent pas être comparées aux valeurs absolues des mesures SPB ou CPB. Les mesures CPX s'appliquent uniquement au bruit issu de l'interaction pneu-revêtement, tandis que les mesures CPB tiennent compte du niveau sonore complet du véhicule. La méthode CPX est moins influencée par les propriétés d'absorption du revêtement. La méthode SPB est, elle, influencée par les effets d'absorption et de propagation.

METHODE DU TAMBOUR

Un pneu d'essai est monté de façon à rouler sur la face intérieure ou extérieure d'un tambour en rotation monté en laboratoire. Le tambour de l'Université technique de Gdansk a un diamètre de 2 m et le pneu se situe à l'extérieur du tambour (voir Figure 63). Le Bundesanstalt für Strassenwesen (BASt) en Allemagne possède par exemple un tambour de 5,5 m de diamètre et où le pneu se situe à l'intérieur (Figure 64). La face choisie est ensuite tapissée du revêtement à étudier. Tout comme pour la méthode CPX, des microphones sont placés à proximité immédiate du pneu. La méthode du tambour est donc également méthode en zone de son direct. Il faut veiller à ce que la mesure ne soit pas influencée par des sons parasites provenant de l'installation ou par des sons réverbérés.



Figure 63 - tambour du BAST.



Figure 64 - tambour du TUG.

COMPARAISON DES METHODES DE ZONE EN SON DIRECT ET EN CHAMP LOINTAIN

Les méthodes en zone de son direct (CPX) présentent incontestablement certains avantages par rapport aux méthodes en champ lointain (SPB, CPB, BB). Les méthodes en zone de son direct peuvent être réalisées en milieu urbain, contrairement aux méthodes en champ lointain (étant donné la présence de surfaces réfléchissantes telles que des façades, etc.). Elles permettent aussi d'échantillonner une route sur une plus longue distance, contrairement aux méthodes en champ lointain où seul le bruit issu d'une petite portion de route (devant le microphone) est mesuré pour chaque point de mesure. Les méthodes en champ lointain demandent également beaucoup plus de temps.

Il faut par ailleurs souligner que les méthodes en champ lointain mesurent le bruit à l'endroit où il est perçu par les personnes qui y sont exposées. Différentes catégories de véhicules peuvent aussi être échantillonnées et analysées statistiquement. Contrairement aux méthodes en zone de son direct, une mesure en champ lointain mesure le niveau sonore global du véhicule (et pas uniquement le bruit de roulement) et tient compte des éventuels phénomènes d'absorption et de réflexion dus au revêtement.

Compte tenu des différences susmentionnées entre les deux approches, il est difficile de déduire des valeurs applicables au champ lointain sur la base des résultats d'une méthode en zone de son direct, et inversement. Il ressort de diverses expérimentations que la différence entre les méthodes en zone de son direct et en champ lointain dépend de la vitesse du véhicule et du type de pneu. Les différences sont en outre largement liées à la fréquence ainsi qu'à l'absorption par la surface entre le véhicule et la position du microphone SPB. De plus amples informations sur la corrélation entre la méthode SPB et la méthode CPX peuvent être retrouvées au^{xxxii}. Les résultats présentent de bonnes corrélations à 80 km/h.

MESURE DE L'ABSORPTION D'UN REVETEMENT

Parallèlement aux méthodes décrites précédemment, qui mesurent le bruit de roulement ou le niveau sonore global d'un véhicule roulant sur un revêtement déterminé, d'autres méthodes servent à déterminer la mesure dans laquelle un revêtement absorbe le son incident. Autrement dit, il s'agit de mesurer le coefficient d'absorption en fonction de la fréquence.

Trois méthodes peuvent être appliquées :

- Le tube d'impédance

Cette méthode est fréquemment utilisée en acoustique et est décrite dans les normes ISO^{xxxiii}. Elle a recours à des échantillons de revêtement ronds (diamètre type d'env. 10 cm), que l'on prélève sur un revêtement existant ou que l'on fabrique en laboratoire. Un "tube de Kundt" est placé à la verticale de l'échantillon (Figure 65) et "fait tomber" des ondes sonores verticales sur l'échantillon. On peut travailler avec des ondes stationnaires, ce qui permet de définir le coefficient d'absorption sur la base du rapport entre les amplitudes des ventres et des noeuds, ou avec la technique des "impulsions sonores". Pour cette dernière, le coefficient d'absorption dépend du rapport entre l'amplitude des ondes incidentes et réfléchies.



Figure 65 - tube d'impédance pour mesurer l'absorption d'un revêtement (Université d'Anvers).

Il est en principe possible d'appliquer cette technique in situ, mais il faut éviter toute fuite sonore entre l'extrémité du tube et le revêtement, ce qui n'est pas toujours aisé.

- La méthode de la "surface étendue"

Cette méthode, décrite dans la norme ISO 13472-1, utilise également des impulsions sonores – celles produites par un pistolet d'alarme, par exemple. Ces impulsions possèdent un large spectre et sont omnidirectionnelles. Il est possible de déterminer le coefficient d'absorption de la surface d'après la différence entre l'amplitude de l'onde directe et de l'onde d'incidence verticale réfléchiée par le revêtement. Un exemple de ce système est présenté à la Figure 66. Cette méthode est appliquée pour des mesures in situ.



Figure 66 - système de mesure M+P de l'absorption d'un revêtement.

- La méthode ponctuelle

La méthode ponctuelle est utilisée pour les mesures in situ et est décrite dans la norme ISO 13472-2. Une onde sonore est envoyée via un tube d'impédance vertical sur le revêtement. La valeur de l'absorption est déterminée à partir du rapport entre le bruit réfléchi et le bruit incident. Cette méthode est comparable à celle du tube d'impédance ISO 10534-2 mentionnée ci-avant, mais dans ce cas-ci, une connexion hermétique est établie entre le tube et le revêtement. La méthode est destinée aux surfaces réfléchissantes. Le résultat est valable de 200 à 2000 Hz.

- La méthode de la chambre de réverbération

Cette méthode est décrite au ^{xxxiii}. Cependant, elle n'est pas beaucoup utilisée dans la pratique pour mesurer l'absorption des revêtements. Lorsque l'on produit un son dans un espace clos et qu'on l'interrompt ensuite brutalement, il arrive que l'observateur présent dans la pièce entende encore un son pendant un certain temps, même après que la source sonore ait été supprimée. La réverbération d'une pièce est due aux répercussions du son entre les parois de cette pièce. Le temps de réverbération d'une pièce T_{60} est défini comme le temps qui s'écoule entre le moment où l'on supprime la source sonore et le moment où le niveau de pression acoustique a décru de 60 dB dans la pièce en question. Le temps de réverbération peut être exprimé à l'aide de la formule de Sabine :

$$T_{60} = 0,161 V / A_{\text{pièce}}$$

où V est le volume de la pièce et $A_{\text{pièce}} = \alpha_{\text{pièce}} S_{\text{pièce}}$ représente la quantité totale d'absorption présente dans la pièce. Le temps de réverbération peut bien entendu varier avec la fréquence, parce que $A_{\text{pièce}}$ en $\alpha_{\text{pièce}}$ varient avec la fréquence.

En mesurant d'abord le temps de réverbération en fonction de la fréquence du son de la source dans une pièce spécialement conçue à cet effet (appelée "chambre de réverbération") et en recommençant ces mesures après avoir placé un morceau du revêtement à analyser dans la chambre de réverbération, on peut déterminer le coefficient d'absorption $\alpha_{\text{échantillon}}$ à partir de la différence de temps de réverbération, en utilisant la formule suivante:

$$A_{\text{échantillon}} = 0,161 V / [S_{\text{échantillon}} (1/T_{60,2} - 1/T_{60,1})]$$

7.5. Revêtements réducteurs de bruit

Dans leur ouvrage de base, 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 définir trois règles élémentaires sous-tendant la réalisation d'un revêtement silencieux:

1. La surface doit présenter une macrotexture suffisamment profonde (profondeur de texture: minimum 0,5 mm). Les agrégats doivent se trouver dans une trame dense et homogène, agencée de façon arbitraire, et être de granulométrie petite à moyenne (maximum 10 mm).
2. Au lieu de présenter une macrotexture, une surface peut également être rendue poreuse (= "très ouverte", drainante) en prévoyant des trous en surface reliés aux creux présents dans la structure du revêtement (minimum 15 % de creux). Si la couche est suffisamment épaisse (minimum 40 mm), cette surface drainante présente en outre une bonne capacité d'absorption acoustique.

3. Il faut veiller à ce que la mégatexture reste minimale et s'assurer de l'homogénéité de la macrotexture.

4. l'élasticité peut avoir un impact favorable sur la réduction du bruit. Néanmoins, il n'est possible d'intervenir qu'au niveau de la composition du mélange. L'expérience avec les revêtements élastiques est toutefois encore en phase expérimentale.

La macrotexture comporte l'avantage additionnel d'améliorer les qualités antidérapantes. Sur un revêtement parfaitement lisse, une couche d'eau de plus en plus épaisse se forme entre le pneu et le revêtement (Figure 67) à mesure que la vitesse augmente, de sorte que l'adhérence du pneu peut diminuer considérablement, voire être réduite à néant (c'est ce que l'on appelle l'aquaplanage). La macrotexture permet d'éliminer l'eau entre le pneu et le revêtement. Le fait de réduire la quantité d'eau projetée permet en outre d'améliorer sensiblement la visibilité par temps de pluie (Figure 68).

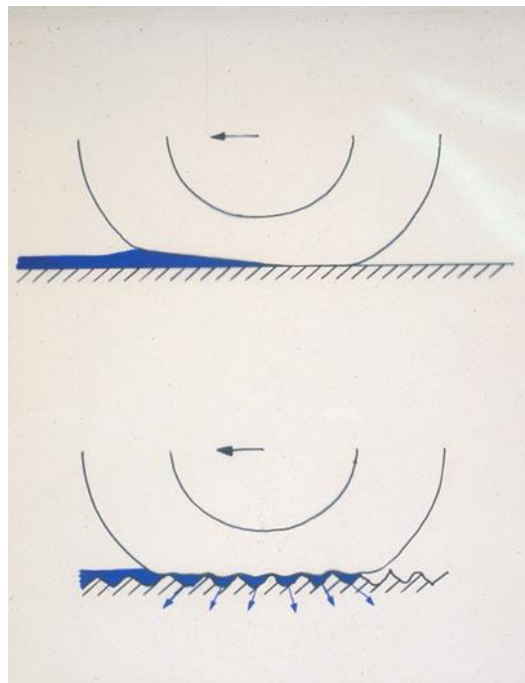


Figure 67 - apparition d'aquaplanage.



Figure 68 - projections d'eau sur un revêtement dense et quasi-absence de celles-ci sur un revêtement ouvert.

Une série de réalisations concrètes illustrant les principes exposés ci-dessus sont proposées dans le reste du paragraphe. On indique chaque fois une définition, les qualités absorbantes et les désavantages éventuels du type de revêtement. La réduction de bruit obtenue est exprimée par rapport à une surface de référence – comme dans la définition du revêtement silencieux fournie précédemment. Cette surface de référence est un SMA 0/11 ou un AC 0/10, qui ont tous deux des caractéristiques acoustiques similaires.

Les types de revêtements silencieux existants sont les suivants :

7.5.1. Enduit contenant de la résine synthétique comme liant

Description : enduit composé d'une couche de liant résineux, couverte d'agréats de très petite granulométrie (taille type 2/4).

Caractéristiques : matériau très résistant, parfois utilisé aux endroits critiques (virages serrés, carrefours,...). Qualités antidérapantes élevées et durables. L'un des revêtements les plus silencieux à ce jour. Les réductions de bruit mesurées varient entre 7,8 et 8,4 dB(A).

Inconvénient : procédé coûteux et caractère innovateur de la technique (manque d'expérience et d'engins de chantier adaptés).

7.5.2. Revêtements en béton dénudé

Description: cette technique consiste à asperger le béton fraîchement posé d'un produit retardateur de prise et ensuite, après environ 24 h, selon la température ambiante et la composition du béton, à broser la couche supérieure de mortier non durci. Entre l'aspersion du retardateur de prise et le brossage du mortier, le béton doit être protégé contre la dessiccation, généralement à l'aide d'un film plastique. Après le brossage, une nouvelle protection doit être mise en place et ce jusqu'à 72 h après la mise en oeuvre du béton. Le dénudage ou brossage est effectué à l'aide d'un véhicule équipé d'un dispositif d'aspersion d'eau et de brosses rotatives. Dans le cas de revêtements esthétiques (béton dénudé coloré), il est préférable d'utiliser un nettoyeur à haute pression pour éliminer plus uniformément la couche de mortier. Le type de retardateur de prise doit être choisi en fonction de la profondeur de dénudage souhaitée et de la granulométrie du béton. Il s'agit la plupart de temps de produits organiques à base de sucre, mais des retardateurs chimiques peuvent aussi être utilisés. La Figure 69 présente une surface typique de béton dénudé.

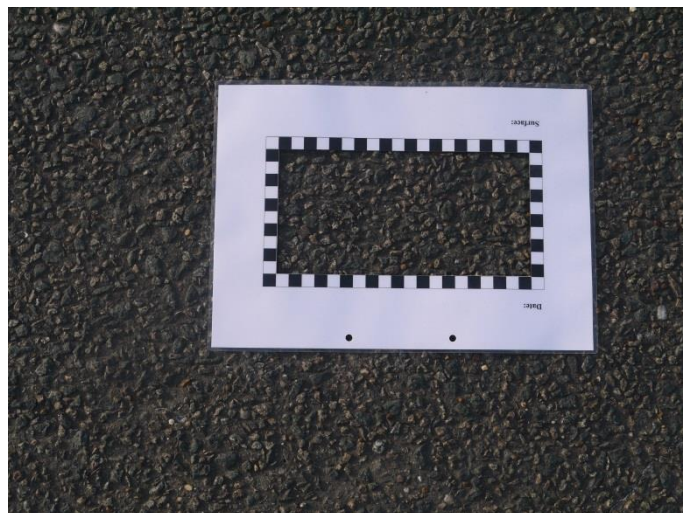


Figure 69 - béton fin.

Caractéristiques : si la pose est effectuée avec le soin requis, cette technique permet d'obtenir d'excellents résultats; il est impératif d'utiliser des agrégats fins et homogènes. Des réductions sonores jusqu'à 2 dB(A) ont été mesurées à 80 km/h par rapport à un AC dans les mêmes conditions avec la méthode CPX, mais la réduction moyenne est plutôt de l'ordre de 1 dB(A)^{xxxiv}. Il importe de choisir la bonne composition de béton, avec une granulométrie maximale limitée à 20 mm et un excès de gravillons entre 4 et 6,3 mm (min. 20 à 25 %). Cet effet est moins visible sur les réalisations plus anciennes, avec une granulométrie plus élevée, et on observe parfois même une augmentation du niveau sonore, mais avec les réalisations neuves, des réductions allant jusqu'à 2,5 dB(A) ont été mesurées avec des revêtements bicouches et jusqu'à 2 dB(A) avec des revêtements monocouches. Une composition correcte est par conséquent cruciale pour obtenir une route durable ayant de bonnes propriétés acoustiques. Les revêtements en béton sont caractérisés par une longue durée de vie ainsi qu'une bonne durabilité, tout en ne nécessitant que peu d'entretien.

La Figure 70 présente les résultats de mesures CPX à 80 km/h et avec un pneu P1 sur plusieurs sections de BAC monocouche et bicouche, ainsi qu'un résultat typique sur un SMA-C (SMA 0/10). Il s'avère que seul le BAC bicouche se rapproche de la surface de référence. Les sections en BAC monocouche semblent toutes être plus bruyantes de 1 à 2 dB(A)^{xxxv}.

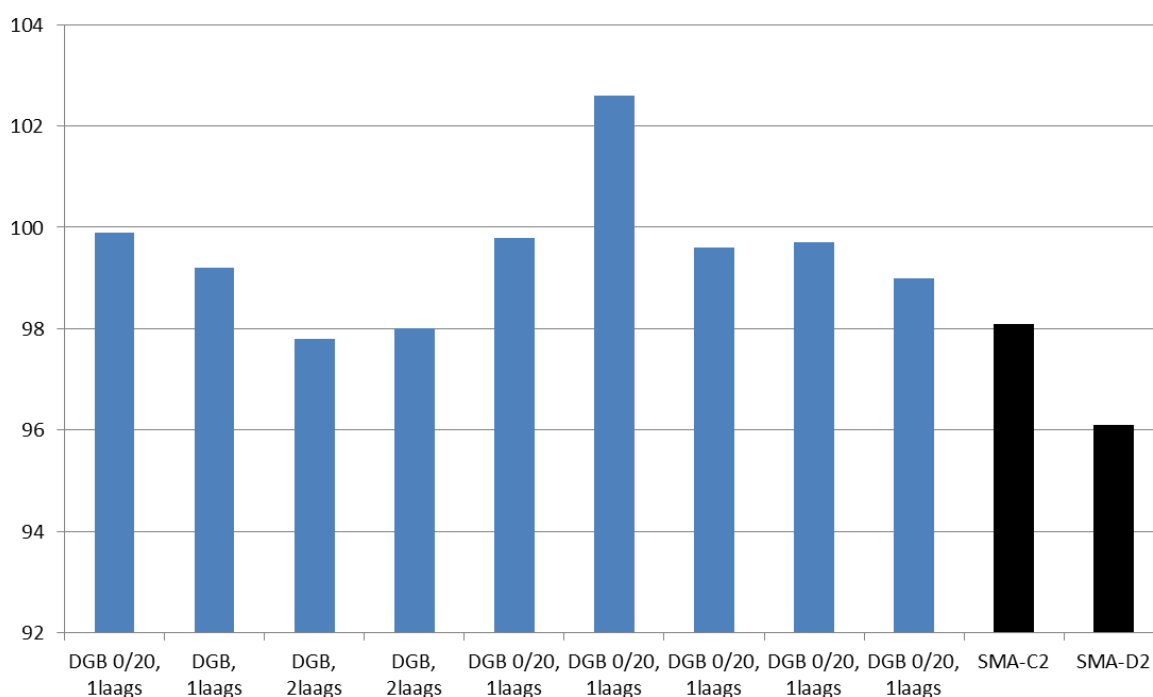


Figure 70 - résultats d'une campagne de mesure CPX réalisée sur plusieurs revêtements en béton fin monocouche et bicouche (béton armé continu), sur des autoroutes flamandes.

Inconvénient : prix plus élevé.

7.5.3. Traitement superficiel de revêtements en béton existants

Fraisage fin des surfaces en béton existantes

Description: la surface en béton de ciment existante est fraisée à l'aide d'une fraiseuse à froid adaptée et équipée d'un nombre plus élevé de fraises, dans le but d'obtenir une meilleure planéité tout en conservant la rugosité et en diminuant le bruit de roulement. Le fraisage fin est toujours réalisé dans le sens longitudinal et selon des bandes parallèles. Il faut veiller à ce que les joints ne soient pas abimés. Le fraisage fin se distingue du fraisage classique par la distance entre les rainures.

Celle-ci est au maximum de 8 mm. Après le fraisage fin, le revêtement doit être nettoyé avec de l'eau sous haute pression. Cette eau doit immédiatement être aspirée pour éliminer tous les restes de poussières.

Meulage de la surface à l'aide de disques diamant

Description : la surface de béton existante est meulée dans le but d'obtenir une meilleure planéité tout en conservant la rugosité et en diminuant le bruit de roulement. Le meulage est réalisé à l'aide d'une machine autocinétique, équipée d'un tambour avec des disques diamant, ainsi que d'une suspension de précision. Le meulage est toujours réalisé dans le sens longitudinal. Le chevauchement des différentes bandes parallèles doit être limité à 50 à 60 mm

Caractéristiques: Après exécution, ce sont les mêmes caractéristiques qui s'appliquent au niveau de la rugosité que pour un revêtement en béton neuf. Les exigences au niveau du coefficient de planéité $CP10_{i,max}$ sont augmentées de 10 unités. Une grande réduction sonore peut être obtenue, surtout sur les revêtements plus anciens, ayant par exemple des rainures transversales (voir Figure 71). Des mesures réalisées avant et après le traitement ont mis en avant une réduction sonore d'environ 5 dB(A).



Figure 71 - meulage d'un revêtement de béton existant à l'aide de disques diamant.

7.5.4. Béton bitumineux drainant

Description: pourcentage élevé de gravillons (81-85 %) de granulométrie 0/14 - à l'exclusion des dimensions 2/7 -, ce qui se traduit par un volume important de vides (env. 20 %). La couche superficielle doit avoir une épaisseur minimale de 4 cm (Figure 72).

Caractéristiques : assure en moyenne une réduction de bruit de 3 dB(A) par rapport à l'AC, mais cette réduction peut varier considérablement d'un endroit à l'autre. Ces résultats ont été établis en fonction de mesures CPB ("coast-by") effectuées sur des revêtements en PA en bon état.



Figure 72 - PA monocouche.

Un autre avantage du PA réside dans le fait que, par temps de pluie, l'augmentation de bruit (due aux projections de gouttelettes, voir...) demeure limitée à 1 dB(A). Cette augmentation peut atteindre 4 dB(A) sur de l'AC.

Pour assurer une réduction de bruit de 3 dB(A) minimum, le PA doit présenter les caractéristiques suivantes:

- Pourcentage total de vides: au moins 20 %
- Granulométrie maximale: 10 à 16 mm
- Épaisseur: minimum 40 mm

Les autres avantages du PA incluent:

- Atténuation de l'effet d'éblouissement causé par les phares des véhicules roulant en sens inverse, la nuit et par temps de pluie
- Réduction des projections d'eau par temps de pluie
- Résistance élevée à l'orniérage

Inconvénients : Les pores tendent à s'obstruer en raison de la boue, de la poussière, de matières huileuses, etc., ce qui peut affecter les performances dépendantes de la porosité et la capacité de drainage. La texture drainante provoque un comportement hivernal spécifique (risque plus important de formation de verglas). Le PA est sensible au plumage, surtout aux endroits où s'exercent d'importants efforts tangentiels.

Le PA convient pour les routes où le trafic est dense et rapide. Plus cela est le cas, moins les vides se colmateront rapidement. Il se produit un effet d'autonettoyage lorsque les véhicules le circulent à haute vitesse. Le PA n'est pas recommandé pour les routes à trafic plus lent.

Une variante est le PA bicouche, qui est utilisé aux Pays-Bas. On applique dans ce cas une couche de PA de petite granulométrie (6,3 mm au maximum, sur une épaisseur de 2,5 à 3 cm) sur une couche de PA de granulométrie plus élevée (14 mm au maximum sur une épaisseur de 4 à 5 cm) (Figure 73).



Figure 73 - PA bicouche.

Grâce à la texture plus fine de la couche supérieure, les vibrations des pneus sont minimales. La réduction sonore généralement obtenue est de 5 dB(A) par rapport à l'AC. Le pourcentage de vides est de 25 à 30 %.

Le problème du colmatage se présente moins rapidement. L'augmentation du bruit au fil du temps est plutôt associée au plumage. Le PA bicouche est encore plus sensible aux efforts tangentiels. Il faut tenir compte d'une augmentation du bruit d'environ 0,4 dB(A)/an pour les voitures particulières et de 0,3 dB(A)/an pour les poids lourds. Lorsqu'il est utilisé à des endroits non appropriés, comme les chemins agricoles où la vitesse est peu élevée, l'augmentation de bruit initiale peut même monter jusqu'à 1 dB(A)/an, voire plus. Avec le PA monocouche, la régression acoustique est de 0,5 dB(A)/an pour les voitures particulières et de 0,3 dB(A)/an pour les poids lourds^{xxxvi}. Un problème rencontré avec le PA bicouche est l'adhérence difficile entre les deux couches. La mise en œuvre de la couche supérieure requiert une grande expertise de la part des exécutants.

L'entretien du PA en hiver exige également une attention particulière, car ce revêtement peut présenter des caractéristiques différentes de l'AC sous l'effet du gel et du dégel. Il faut donc adopter une stratégie adaptée au revêtement lorsque l'on utilise des sels d'épandage^{xxxvii}.

7.5.5. Revêtements minces

Description: Les revêtements minces conviennent pour de nombreux endroits en milieu urbain. Ils sont apparus suite au souhait de plusieurs pays européens d'obtenir des revêtements moins onéreux que le PA tout en offrant une durée de vie comparable à celle de l'AC. Un revêtement mince est un revêtement bitumineux dont l'épaisseur est de 3 cm au maximum, et peut ou non avoir une structure drainante.

Le revêtement mince combine plusieurs caractéristiques intéressantes: il est assez bon marché (comparativement à l'AC), absorbe le bruit et est relativement durable. Les réductions acoustiques généralement obtenues à 40 à 60 km/h sont pour les voitures de 1 à 3 dB(A) avec les versions denses et de 2 à 4 dB(A) avec les versions poreuses. La réduction sonore est obtenue en optimisant la texture. Une application généralisée de ce type de revêtement constitue une façon économique et intéressante pour lutter contre le bruit dans les villes et les communes.

Inconvénients: Il faut effectuer un choix bien réfléchi, en tenant compte des conditions spécifiques du lieu, car il ne peut pas être appliqué partout de la même manière. Il faut rechercher un compromis entre la durabilité et le bruit^{xxxviii}, selon les besoins locaux. Une attention suffisante doit être portée à la mise en oeuvre, étant donné le risque plus élevé de plumage et de détachement du support.

Le CRR a contribué à une étude détaillée portant sur les recouvrements minces au sein du projet Eranet Road Opthinal: “OPTimization of THIN Asphalt Layers”^{xxxix}. Tous les aspects imaginables y sont abordés: environnement, durabilité et technologie. Les avantages et les inconvénients, ainsi que les critères d’application, y sont aussi traités (voir Tableau 2).

Tableau 2:

	Prioritized property →	Low cost	Low RR	Low noise	Long life	High skid resistance	Low height
Urban and sub-urban areas	Residential streets, low traffic	+++	+++	+++	+++	++	+++
	Streets with stop-and-go traffic	o	o	--	-	+	o
	Streets with much turning traffic	o	+	+	-	+	o
	Streets with high grades	o	o	--	--	o	o
	Medium-volume streets	+++	+++	+++	++	++	++
	High-volume streets, inner-city	++	+	+	+	++	+++
	High-volume streets, arterials	++	++	+++	++	+	+
Extra-urban and rural areas	Low volume country roads	+++	+++	+++	+++	++	+
	Highways, max 80 km/h	+++	+++	+++	+++	++	++
	Highways, over 80 km/h	+++	++	++	++	+	++
	Motorways	+++	+	o	+	+	++
	Mountain roads	+	++	+	--	+	+

Ratings:

+++ Highly recommended (best practice), should mean no problem

++ Highly recommended, with caution for certain critical cases

+ Recommended with caution

o Neutral, maybe be feasible and not feasible (high risk of failure)

- Not recommended

-- To be avoided

Les problèmes éventuels définis au sein du projet Opthinal sont les suivants:

Risque élevé:

- Plumage (Voir Figure 74):
 - A éviter aux endroits où se produisent des efforts tangentiels (ronds-points, carrefours, sorties de poids lourds ou de bus, parkings, etc.)
 - Pas de mise en œuvre à des températures trop basses
 - Les types drainants sont plus sensibles que les types denses



Figure 74 - plumage d'une couche mince.

- Délamination (détachement de la couche inférieure, voir Figure 75):
 - A éviter aux endroits où se produisent des efforts tangentiels
 - Prévoir une couche d'accrochage de bonne qualité
 - Attention particulière pour les saletés sur la couche inférieure
 - Pas de mise en œuvre de la couche d'accrochage ou de la couche mince par temps humide



Figure 75 - détachement d'une couche mince de la couche inférieure (aussi appelé délamination ou pelade).

Risque modéré:

- Rugosité initiale trop basse: épandage (les premières semaines, épandre des granulats fin de 1 à 2 mm sur le revêtement jusqu'à usure complète de la couche de bitume et amélioration de la rugosité)

Risque faible à élevé:

- Fissuration due à une couche inférieure déficiente: à éviter sur des supports instables comme les dalles de béton ou toutes les sortes de pavages
- Inégalités transversales ou longitudinales trop importantes: veiller à ce que la planéité du support soit acceptable
- Refroidissement trop rapide du mélange, mauvaise durabilité/homogénéité du compactage:
 - Bonnes conditions météorologiques lors de la mise en oeuvre (température suffisante, absence de pluie)
 - Utiliser des chauffages

7.5.6. Revêtement poroélastique

Description: Un revêtement poroélastique est constitué de grains de caoutchouc (généralement issus de pneus moulus), de granulats et d'une résine synthétique élastique (généralement du polyuréthane) comme liant (voir Figure 76).

Caractéristiques: Il a été démontré que les revêtements élastiques pouvaient présenter des propriétés d'absorption du bruit assez impressionnantes: une diminution du bruit de roulement de 10 dB(A) est possible. Au sein du projet PERSUADE, une réduction sonore de 8 à 10 dB(A) par rapport à un AC a été mise en avant. D'un point de vue uniquement économique et esthétique déjà, ils représentent une alternative attrayante aux écrans antibruit.

Inconvénients: Avant de pouvoir utiliser ce type de revêtement pour lutter contre le bruit, certains problèmes doivent encore être solutionnés. La durabilité fait actuellement (avril 2015) l'objet d'essais sur cinq sections expérimentales situées dans quatre pays européens, dont la Belgique. Il est plus cher qu'un revêtement conventionnel et ne peut être utilisé que sur certains points noirs spécifiques où les nuisances sonores sont importantes. La rugosité initiale doit être améliorée dans certains cas en réalisant un épandage sur le revêtement.

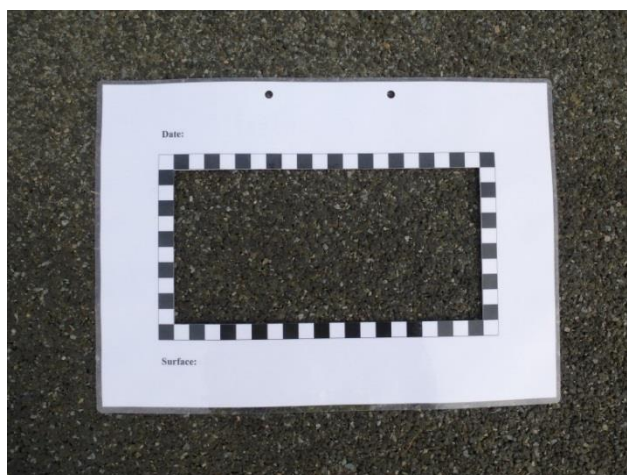


Figure 76 - revêtement poroélastique.

Le Tableau 3 donne un aperçu des caractéristiques acoustiques et des principales caractéristiques non acoustiques de l'AC et de quelques revêtements (un peu plus) silencieux courants.

Tableau 3

	AC	PA	SMA	Enduit avec résine	Béton dénudé	Recouvrement mince
Réduction sonore moyenne par rapport à de l'AC, en dB(A)	0	3 (monocouche) 5 (bicouche)	1 à 3	Jusqu'à 8	1 à 3	1 à 5
Résistance à la déformation permanente	Bonne	Très bonne	Très bonne	Selon le support	Très bonne	Selon le support
Durée de vie moyenne, en années	12 à 15	10 à 12 (7 – 9 pour PA bicouche)	12 à 15	12 à 13	2 5 -	7 - 10
Rugosité(μ)	0,35 - 0,55	0,4 – 0,5	0,4 – 0,55	0,85 – 0,9	0,4 – 0,7	0,35 - 0,55
Perméabilité	Etanche	Perméable	Etanche	Etanche	Etanche	Etanche
Projections d'eau	Moins bon	Très bon	Moyen	Moins bon	Moins bon	Moyen
Entretien structurel	normal	joints!4	normal	normal	normal	normal
Entretien fonctionnel	normal	difficile	normal	normal	normal	normal
Durée de la mise en oeuvre	De 5 h à 1 jour	De 5 h à 1 jour	De 5 h à 1 jour		De 3 à 7 jours	De 5 h à 1 jour

7.5.7. Autres revêtements expérimentaux

Plusieurs autres types de revêtements^{xi} ont été testés par le passé dans l'espoir de faire diminuer le niveau sonore, comme le revêtement euphonique (avec des résonateurs de Helmholtz dans la couche inférieure) et les revêtements contenant des billes poreuses d'argile expansée, mais sans succès.

7.6. Influence de l'usure sur la production sonore

Les qualités acoustiques d'un revêtement évoluent généralement au fil du temps. Ces modifications sont très importantes dans certains cas et très limitées dans d'autres. Le type de revêtement joue un rôle déterminant dans cette évolution. Le vieillissement acoustique des revêtements a été étudié au sein du projet CEDR QUESTIM^{xli}. Le vieillissement dépend des conditions météorologiques et du type de route. L'augmentation du bruit dans le temps est plus importante pour les voitures particulières que pour les poids-lourds (environ le double). De manière générale, l'influence de l'usure se résume comme suit sur les autoroutes d'Europe centrale et du sud (voir Tableau 4):

Tableau 4:

Type de revêtement avec granulométrie maximale	Perte de qualité acoustique dB(A)/an: Voitures particulières	Perte de qualité acoustique dB(A)/an: trafic lourd
Béton dénudé chimiquement	0,1	0,1
SMA11 et SMA16	0,15	0,1
AC 8, 11 et 16	0,2	0,1
SMA8 et SMA6	0,2	0,1
PA 8 bicouche	0,4	0,3
PA 8 à 16 monocouche	0,5	0,3
Recouvrement mince 6	0,7	0,5

- L'AC présentant une texture superficielle réduite ou inexistante: le niveau de bruit augmente légèrement pendant un à deux ans et se stabilise ensuite jusqu'à la fin de la durée de vie du revêtement, lorsque celui-ci commence à se dégrader (détachement de morceaux de bitume, apparition de fissures, etc.).
- Les enduits présentant une mégatexture (granulométrie 10/16 mm, par exemple) deviennent un peu plus silencieux (1 à 2 dBA) au cours des premières années, car la mégatexture d'origine est nivelée par le passage des véhicules. Le niveau de bruit inhérent au revêtement se stabilise ensuite, pour augmenter de nouveau à la fin de sa durée de vie, à cause du détachement des gravillons en surface, etc.

- Les revêtements en PA perdent progressivement leurs qualités acoustiques, en raison de l'obstruction des creux (réduction de l'absorption) et du détachement de gravillons de la couche supérieure (augmentation de la mégatexture). L'usure est très rapide dans certains cas et plutôt lente dans d'autres. On peut partir du principe que la réduction de bruit sera de 3 dB(A) au maximum pendant les quatre premières années qui suivent la pose du revêtement.
- Le niveau de bruit généré par le béton ne présente guère de variations pendant sa durée de vie. La durée de vie touche à sa fin lorsque la fondation n'assure plus son rôle et que des fissures apparaissent à la surface. Il est fait état de pertes annuelles de réduction sonore de l'ordre de 0,1 dB(A) pour le béton dénudé chimiquement.
- Recouvrements minces: Lors d'un projet expérimental de l'Agentschap Wegen & Verkeer, huit recouvrements minces différents ont été posés sur la N19 Turnhout-Kasterlee^{xlii}. Les performances acoustiques ont fait l'objet d'un suivi dans le temps. Deux ans après la mise en œuvre, les sections expérimentales présentaient une augmentation de bruit de 0,4 à 1,9 dB(A) par an (méthode SPB). Cette augmentation a clairement pu être reliée au plumage. Les valeurs généralement rapportées au sein d'autres projets sont de 0,3 à 0,8 dB(A) par an (projets QUESTIM, OPTHINAL, Nordic Roads^{xliii}).

L'ouvrage de base de Sandberg et Ejsmont, ainsi que le deliverable D2.2 van het QUESTIM-project^{xliiv}, proposent un aperçu détaillé des types de revêtements les plus courants et de leur niveau de bruit en fonction de leur âge, de la composition du trafic (voitures – poids lourds) et de la vitesse des véhicules.

7.7. 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 77), ce qui accentue la mégatexture du revêtement et, par conséquent, le niveau de bruit généré.



Figure 77 - revêtement bitumineux réparé de manière peu soignée avec de l'asphalte coulé.

Poser une couche d'AC sur des pavés n'est pas une solution durable. La couche de béton bitumineux se déchire et s'érode rapidement: le revêtement se caractérise alors par une mégatexture importante (et est donc très bruyant) et un aspect peu esthétique (Figure 78).



Figure 78 - recouvrement de pavés par une couche bitumineuse.

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. Celles-ci sont décrites dans les chapitres L.4.2 et L.4.3 du cahier des charges types de la Région de Bruxelles-Capitale^{xlv}.

Une réparation durable, effectuée dans les règles de l'art, comporte huit étapes:

1. délimiter le lieu de réparation
2. inciser à la verticale et enlever le revêtement (Figure 79)
3. nettoyer et sécher (Figure 80)
4. poser un agent collant (Figure 81)
5. poser une garniture d'étanchéité préformée (Figure 82)
6. combler le creux à l'aide de béton bitumineux coulé à chaud
7. compacter le mortier de remplissage (Figure 83)
8. épandage superficiel

La Figure 84 montre le résultat obtenu. Le travail manuel est souvent inévitable, ce qui crée des zones plus sensibles au début et à la fin de la section.



Figure 79 – incision.



Figure 80 - nettoyage et séchage.



Figure 81 - pose de l'agent collant.



Figure 82 - pose de la garniture.



Figure 83 – compactage.



Figure 84 - résultat final.

7.8. Coûts liés à la pose des revêtements routiers silencieux

Ce point examine le facteur “coûts” sous deux perspectives :

1. Quels sont les coûts liés à la pose d'un revêtement déterminé? En d'autres termes, comment faire un choix financier lorsqu'il faut poser (remplacer) un revêtement routier? Quelles sont les conséquences financières selon que l'on choisit un revêtement en PA au lieu d'un AC traditionnel ?
2. Supposons une situation problématique entraînant des nuisances sonores pour un certain nombre de riverains. Comment faire un choix qui sera également judicieux sur le plan financier parmi les différentes mesures d'assainissement envisageables ?

7.8.1. Coûts inhérents à la pose et à l'entretien des revêtements routiers

Trois éléments sont en réalité compris dans le coût d'un revêtement: les coûts inhérents à la pose, les coûts liés au petit entretien (nettoyage du PA, par exemple) et les coûts liés au grand entretien.

Les coûts de pose relatifs ($AC\ 0/14 = 1$) de quelques-uns des types de revêtements abordés dans le présent chapitre sont donnés dans le tableau 5^{xlvi};

Tableau 5:

couche de roulement	coûts de pose relatifs par rapport à un AB-1B
AB-1B de référence (AC 0/14)	1
AC (tous types et épaisseurs)	0,5 - 0,9
AC gravillonné	1,2
SMA	0,9 - 1,6
PA (monocouche)	0,8 - 0,9
PA (bicouche)	2
recouvrement mince	0,6 – 2
enduits (bitume)	0,3 - 0,5
enduit (époxy)	6
béton (20 cm)	4,6
béton (1 cm)	0,23
pavés en pierre naturelle	5,7 – 6
pavés en béton	2,9 – 3,6

Le matériau choisi et la quantité ne sont pas les seuls facteurs qui déterminent le coût d'un revêtement, puisque la stratégie d'entretien retenue entre également en ligne de compte.

7.8.2. Analyse coût-bénéfice des différentes mesures de lutte antibruit

Il est difficile de donner une description générale d'une telle analyse, compte tenu de la grande diversité des facteurs qui déterminent les coûts et la réduction de bruit.

Un problème de bruit dû au trafic soulève néanmoins toujours les mêmes questions, auxquelles il faut trouver les réponses :

- Quelles sont les mesures antibruit envisageables dans la situation donnée ?
- Quels sont les avantages et les inconvénients connexes, non acoustiques (par exemple, obstruction du champ de vision par les écrans antibruit), des différentes mesures envisageables ?
- Quelle est la mesure la plus efficace ? En d'autres termes, quelle est la mesure assurant la réduction de bruit la plus importante (en dBA), quel que soit son coût ?
- Quelle est la mesure la plus efficace en termes de coûts ? Autrement dit, quelle est la mesure assurant la réduction de bruit la plus importante pour chaque euro dépensé ?

Les réponses avancées doivent bien entendu tenir compte de tous les facteurs susceptibles de jouer un rôle, notamment :

- la vitesse du trafic
- la composition du trafic
- le nombre et le type d'habitations à protéger contre le bruit

- la situation des habitations par rapport à la route (hauteur, distance, le long d'un seul côté de la route ou des deux côtés)
- le prix/m² d'un revêtement silencieux (du PA bicouche, par exemple)
- le prix/m² d'un écran antibruit
- ...

Les prix indicatifs par m² applicables à un certain nombre de revêtements routiers courants sont repris au tableau 6 ci-après. Les prix indicatifs des écrans figurent dans la fiche 11.

Lorsque toutes les données pertinentes sont réunies, on peut s'attacher à répondre aux questions précédentes en fonction de chaque cas spécifique. Un exemple-type danois^{xlvii}, explique comment réaliser ce genre d'analyse coût-bénéfice et calcule le coût de l'assainissement d'un kilomètre de rue dans le centre- ville (50 km/h), d'un kilomètre de route sur le ring (70 km/h) et d'un kilomètre d'autoroute en banlieue (110 km/h).

Les spécifications adoptées sont résumées dans le tableau 6.

Tableau 6 :

	Rue en ville	Ring	Autoroute
Vitesse de référence (km/h)	50	70	110
Nombre de bandes de circulation	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 véhicules/jour	12 000	30 000	60 000
% de véhicules lourds	10	10	10
Niveau de bruit au premier étage (L _{Aeq,24heures} en dBA)	68	73	77
Type d'habitations	Blocs d'appartements accolés, 6 étages, avec des magasins au rez-de-chaussée	Blocs d'appartements accolés, 3 étages	Maisons unifamiliales
Nombre d'habitations	665	399	435

On peut envisager trois types de mesures :

- poser du vitrage isolant de type 6-12-4-9-4 (6 mm de verre, 12 mm d'air, 4 mm de verre, 9 mm d'air et 4 mm de verre) au lieu du type traditionnel 4-12-4. Les vitrages ordinaires offrent une réduction de bruit de 26 dB(A) à l'intérieur, par rapport au bruit mesuré à l'extérieur. Les vitrages acoustiquement performant peuvent quant à eux offrir une réduction de bruit allant jusqu'à 34 dB(A). L'inconvénient de cette solution réside dans le fait qu'elle protège exclusivement les personnes qui se trouvent à l'intérieur de l'habitation, lorsque les fenêtres sont fermées.

- remplacer le revêtement routier par du PA bicouche (couche supérieure en PA de 25 mm, d'une granulométrie maximale de 8 mm, et couche inférieure en PA de 45 mm, d'une granulométrie maximale de 16 mm). La réduction de bruit obtenue est de 5 dB(A) à 50 km/heure. Les réductions peuvent atteindre 6-7 dB(A) pour des vitesses plus élevées. On suppose que le PA peut conserver ses qualités acoustiques pendant toute sa durée de vie, moyennant un nettoyage à l'eau à haute pression deux fois par an. Il s'est entre-temps avéré que cette mesure n'était pas efficace en ville en raison du colmatage trop rapide des vides, mais on pourrait opter pour un recouvrement mince avec une réduction sonore qui avoisine dans la plupart des cas celle d'un PA bicouche. Le nettoyage du PA n'est pas réalisé dans la pratique.

- installer un écran antibruit de 2,5 m de haut, ce qui assure une réduction de 12 dB(A) au rez-de-chaussée, mais de 0 dB(A) au premier étage et aux étages supérieurs (en effet un écran anti-bruit agit principalement dans sa zone d'ombre acoustique). Un écran antibruit offre une atténuation de bruit plus importante, mais est évidemment plus coûteux, produit davantage d'ombre et constitue une gêne visuelle. Il est généralement impossible d'installer des écrans antibruit en ville, pour des raisons esthétiques et pratiques. Dans ce cas, cette solution ne peut donc pas être retenue et ne sera donc pas évaluée.

Les coûts sont calculés en euros sur 30 ans; il s'agit de la durée de vie des écrans antibruit et des vitrages antibruit. La couche inférieure d'un revêtement antibruit doit être remplacée tous les 15 ans et la couche supérieure, tous les 7-8 ans.

Le tableau 7 résume les coûts/économies par poste de dépense, pour les trois mesures antibruit visées.

Tableau 7:

Poste de dépense	Coût
PA bicouche	
Couche supérieure PA 25 mm (8mm)	5,4 €/m ²
Couche inférieure PA 45 mm (16 mm)	9,7 €/m ²
AC d'une épaisseur plus fine que le PA (30 mm superflu grâce à la force portante supérieure du PA)	-4,7 €/m ²
Enlèvement de la couche supérieure	3,4 €/m ²
Drains (nécessaires si l'on utilise du PA)	53,6 €/mètre courant
Nettoyage des pores du PA, par nettoyage	0,07 €/m ²
Nettoyage des drains	1,34 €/mètre courant
Surcoût de l'entretien hivernal du PA	1610 €
Vitrage isolant	
Coût moyen de l'isolation d'un appartement	4030 €
Coût moyen de l'isolation d'une maison	6640 €
Écran antibruit	
Écran antibruit de grande qualité,	2,5 m de haut 255 €/m ²
Coûts d'entretien de l'écran	2,2 €/mètre courant/an

Compte tenu des données susmentionnées, les coûts des différentes options applicables à différents endroits ont été calculés comme suit (tableau 8).

Les coûts calculés sont les valeurs VAN pour une période de 30 ans et un taux d'intérêt de 7 %, calculé à l'aide de la formule:

$$VAN = A + K1/(1 + i)^1 + K2/(1 + i)^2 + K3/(1 + i)^3 + \dots + KN/(1 + i)^N$$

où

A est la somme des coûts liés au matériau et aux frais d'acquisition

K_n représente les coûts d'entretien de l'année n -de

i est le taux d'intérêt que peut rapporter un capital placé

N est la durée de vie

Tableau 8 : estimation des coûts en euros des différentes mesures de lutte antibruit pour 1 km de voirie

		Rue en ville	Ring	Autoroute
PA	Coût sur 30 ans	296.000	360.000	477.000
	Réduction de bruit en dB(A)	5	6	7
	Coût/dB(A)/habitation	89	150	157
Ecran	Coût sur 30 ans	-	1.335.000	1.590.000
	Réduction de bruit en dB(A)	-	0-12 (moyenne: 3,9)	4-13 (moyenne: 8,5)
	Coût/dB(A)/habitation	-	851	430
Isolation	Coût sur 30 ans	2.685.000	1.607.000	578.000
	Réduction de bruit en dB(A)	9	9	9
	Coût/dB(A)/habitation	449	448	148

Dans ces exemples, le prix total (VAN) et le coût en VAN par dB(A)/habitation sont nettement favorables au PA. Le PA offre sans doute une réduction de bruit globale moins importante que les deux autres solutions, mais ces dernières comportent des inconvénients absents chez le PA (écran: gêne visuelle, ombre,... Quant aux vitrages d'isolation acoustique, ils sont seulement efficaces à l'intérieur, avec les fenêtres fermées). Il ressort des enquêtes menées auprès des riverains, avant et après les interventions, que les nuisances ressenties sont bien plus atténuées par la pose d'un revêtement silencieux que par l'installation d'écrans antibruit. Les inconvénients secondaires des écrans peuvent contribuer à l'expliquer.

La fiche 12 du volume I se penche sur la combinaison de plusieurs mesures (concrètement, la pose de PA et l'installation d'écrans antibruit).

En outre, la solution retenue relève en partie d'une décision politique: quels efforts financiers est-on disposé à consentir pour réduire le problème du bruit ? La solution doit-elle présenter le meilleur rapport coût-bénéfice ou aspire-t-on à obtenir une réduction de bruit maximale et accepte-t-on de fournir un effort financier plus important à cet effet ? Quelle importance accorde-t-on aux inconvénients et/ou avantages secondaires des différentes solutions possibles ?

7.9. Bibliographie

-
- ⁱ Typebestek 2011: F.1.2.8.1; SB 250: 6-1.4.10.2 Qualiroutes: G. 1.2.8.1
- ⁱⁱ Typebestek 2011: F.1.2.8.3; SB 250: 6-1.4.10.5 Qualiroutes: G. 1.2.8.3
- ⁱⁱⁱ SB 250: 12-1.6.1 en naar Qualiroutes M.2.1
- ^{iv} SB 250 12-1.6.3 – Qualiroutes M.2.2
- ^v Qualiroutes M.2.3
- ^{vi} Qualiroutes M.2.4
- ^{vii} Dossier 5: Waterdoorlatende verhardingen met betonstraatstenen, Bijlage bij OCW Mededelingen 77, 2008
- ^{viii} ISO 13473 parts -1, -2 and -3
- ^{ix} Sandberg U., Descornet G., Road surface influence on tyre/road noise Part I, INTERNOISE – The international conference on noise control engineering, Miami, Florida USA, 1980
- ^x Descornet, G.; Faure, B.; Hamet, J.-F.; Kestemont, X.; Luminari, M.; Quaresma, L.; Sandulli, D. (2001): „Traffic noise and road surfaces: State of the art“, FP5 SIRUUS project deliverable, O.C.W. (Brussel)
- ^{xi} Dietrich K., Essers U., Huschek S., Köster H., Pohle G., Prickartz R., Springborn M., Schwarz R., Zur Bewertung des Einflusses der Fahrbahnen auf das Reifengeräusch, Strasse und Autobahn, heft 9, 1988; Hamet J.-F., Bruit et nuisances sonores – Relation entre la texture de la chaussée et le bruit rayonné par le pneumatique, Second Carrefour PREDIT, Livre des Communications, pp. 131-135, 23-25 maart 1999 en vele andere, zie voor een overzicht: Goubert, L., Bergiers, A., Karlsson, R., Tan Do, M., Sandberg, U., „State-of-the-art concerning texture influence on skid resistance, noise emission and rolling resistance“, ROSANNE WP4 Deliverable D4.1, 2014
- ^{xii} Goubert, L., Bergiers, A., Karlsson, R., Tan Do, M., Sandberg, U., „State-of-the-art concerning texture influence on skid resistance, noise emission and rolling resistance“, ROSANNE WP4 Deliverable D4.1, 2014
- ^{xiii} Descornet, G.; Faure, B.; Hamet, J.-F.; Kestemont, X.; Luminari, M.; Quaresma, L.; Sandulli, D. (2001): „Traffic noise and road surfaces: State of the art“, FP5 SIRUUS project deliverable, O.C.W. (Brussel)
- ^{xiv} www.silentroads.nl
- ^{xv} BECKENBAUER, T. ET AL, 2001. Einfluss der Fahrbahn-textur auf das Reifen-Fahrbahn-Gerausch, Report FE 03.293/1995/MRB. Bundesanstalt für Strassenwesen (BASt). Bergisch Gladbach. Duitsland.
- ^{xvi} Kuijpers, A., Van Blokland, G., „SIMULATION TOOL FOR ROAD/TYRE MODELLING: The influence of road parameters on tyre/road noise, SILENCE, C.D2, 2006
- ^{xvii} www.persuadeproject.eu
- ^{xviii} Sandberg U., Ejsmont J.A., „Tyre/road reference book“, INFORMEX, Kisa, Zweden (2002)
- ^{xix} Shima e.a., „The effect of rain on the noise reduction of porous asphalt pavement“, INTERNOISE, Yokohama (1994)
- ^{xx} Bartolomaeus, W., SILENCE, F.D14, Noise classification methods for urban road surfaces: Classification Methodology, 2005
- ^{xxi} Bartolomaeus, W., SILENCE, F.D14, Noise classification methods for urban road surfaces: Classification Methodology, 2005
- ^{xxii} Sandberg U., Ejsmont J.A., „Tyre/road reference book“, INFORMEX, Kisa, Zweden (2002); Descornet G., „A criterion for optimising surface characteristics“, Transportation Research Board, Washington DC, 1215 (1989); Bergmann M., „Geräuschestehung beim rollen ober benetzten oberflächen“, Technische Universität Berlin (1979)
- ^{xxiii} Bijvoorbeeld AFNOR Standard NF 31-085
- ^{xxiv} 2002/49/EC
- ^{xxv} ISO 362-1:2015 en 362-2:2009
- ^{xxvi} ISO 10844:2014
- ^{xxvii} ISO 11819-1
- ^{xxviii} ISO/PAS 11819-4:2013
- ^{xxix} ISO 11819-2
- ^{xxx} ISO/TS 11819-3
- ^{xxxi} Kragh, J. „Report on the analysis and comparison of existing noise measurement methods for noise properties of road surfaces“, Deliverable D2.3 van het Europese ROSANNE-project, te downloaden van <http://rosanne-project.eu/>
- ^{xxxii} ISO 10534-1 en 10534-2
- ^{xxxiii} ISO 354

-
- ^{xxxiv} Vanhooreweder, Barbara, “Luidheid bij Belgische wegverhardingen”, presentatie Silentroads Vlaanderen, 14 oktober 2014, downloadbaar via <http://www.silentroads.be/>
- ^{xxxv} De Clerck, K. (Administratie Wegen en Verkeer), persoonlijke mededeling
- ^{xxxvi} Van Blokland, G., Tollenaar, C., van Loon, R., QUESTIM D2.2: Modelling of Acoustic Aging of Road Surfaces, 2014, downloadbaar op <http://www.questim.org/>
- ^{xxxvii} Opzoekingscentrum voor de Wegenbouw, Researchverslag: “Proefvak tweelaags zeer open asfalt”, RV41/05, O.C.W., 2005
- ^{xxxviii} Bergiers, A., De Visscher, J., Denolf, K., Destrée, A., Vanhooreweder, B., Vuye, C., “Test sections to study the acoustic quality of thin noise reducing asphalt layers”, ISMA Noise and Vibration Engineering Conference 2014, Leuven, 15-17 september 2014
- ^{xxxix} Kragh, J., Nielsen, E., Olesen, E., Goubert, L., et al. ,OPTHINAL: Optimization of Thin Asphalt Layers, Final Report, 2011, downloadbaar via <http://www.brrc.be/document/opthinal/>
- ^{xl} Descornet G. e.a., “Traffic Noise and Road Surfaces: State of the Art”, SI.R.U.US PROJECT, uitgave van het Opzoekingscentrum voor de Wegenbouw, Brussel (2000)
- ^{xli} Van Blokland, G., Tollenaar, C., van Loon, R., QUESTIM D2.2: Modelling of Acoustic Aging of Road Surfaces, 2014, downloadbaar op <http://www.questim.org/>
- ^{xlii} Bergiers, A., De Visscher, J., Denolf, K., Destrée, A., Vanhooreweder, B., Vuye, C., “Test sections to study the acoustic quality of thin noise reducing asphalt layers”, ISMA Noise and Vibration Engineering Conference 2014, Leuven, 15-17 september 2014
- ^{xliii} <http://nordicroads.com/>
- ^{xliv} Van Blokland, G., Tollenaar, C., van Loon, R., QUESTIM D2.2: Modelling of Acoustic Aging of Road Surfaces, 2014, downloadbaar op <http://www.questim.org/>
- ^{xlv} TB2011, Typebestek
betreffende wegeniswerken
in het Brussels Hoofdstedelijk Gewest,
downloadbaar via <http://www.mobielbrussel.irisnet.be/partners/professionelen/tb-2011>
- ^{xlvi} “Handleiding voor de keuze van de asfaltverharding bij het ontwerp of onderhoud van wegconstructies”, Opzoekingscentrum voor de Wegenbouw, A78/06 (2006), te bestellen via www.ocw.be
Aangevuld met informatie verkregen via communicatie met Margo Briessinck van Agentschap Wegen en Verkeer en Vincent Thibert van Bruxelles Mobilité
- ^{xlvii} Larsen Lars Ellebjerg en Bendtsen, Hans, “Costs and perceived noise reduction of porous asphalt pavements”, Proceedings Internoise 2001 (Den Haag)