



RAPPORT

DISPOSITIONS D'EXÉCUTION EN MATIÈRE D'ACOUSTIQUE POUR LES ENROBÉS
SEMI-DENSES

ANALYSE DES PARAMÈTRES MÉCANIQUES

Contact : Erik Bühlmann
erik.buehlmann@grolimund-partner.ch
T 031 356 20 06

I:\A4684\BERICHT\ber20170320_V3_AusfbestAkustikFuerSemidichteAsphalte.docx

Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) et du Canton d'Argovie
A4684 & A4822
21. Octobre 2019

Traduction ; 2019

GROLIMUND + PARTNER AG
THUNSTRASSE 101A, 3006 BERN
031 356 20 00
WWW.GROLIMUND-PARTNER.CH
BERN@GROLIMUND-PARTNER.CH

NIBUXS SÀRL
CHEMIN DU CROSET 9, 1024 ECUBLENS
021 550 95 32
WWW.NIBUXS.CH
INFO@NIBUXS.CH

IMPRESSUM

MANDANTS

- + Office fédéral de l'environnement (OFEV), Division Bruit et RNI, CH-3003 Berne. L'OFEV est un office du Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC).
- + Canton d'Argovie, Division Génie Civil, CH-5001 Aarau

MANDATAIRES

- + Grolimund + Partner AG, Thunstrasse 101A, 3006 Berne
- + Nibuxs SÀRL, Chemin du Croset 9, 1024 Ecublens

AUTEURS

- + Erik Bühlmann, Grolimund + Partner AG
- + Emanuel Hammer, Grolimund + Partner AG
- + Nicolas Bueche, Nibuxs sàrl
- + Jacques Perret, Nibuxs sàrl

SUIVI

- + OFEV : Simon Steiner
- + Canton d'Argovie : Hanspeter Gloor

COMMISSION DE SUIVI

- + Hanspeter Gloor, Division Génie Civil Canton d'Argovie
- + Hans-Peter Beyeler, Division infrastructure routière & soutien technique, Office fédéral des routes OFROU
- + Hans-Peter Bucheli, Implenia Suisse SA & Président CNR 3.9
- + Stefano Bradanini, Division Génie Civil Canton d'Argovie
- + Dominique Schneuwly, Bruit et RNI, Office fédéral de l'environnement OFEV
- + Simon Steiner, Bruit et RNI, Office fédéral de l'environnement OFEV
- + Fabian Traber, Division Génie Civil Canton d'Argovie

REMARQUE

- + Ce rapport a été rédigé sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) et du Canton d'Argovie. Les mandataires sont les seuls responsables de son contenu.

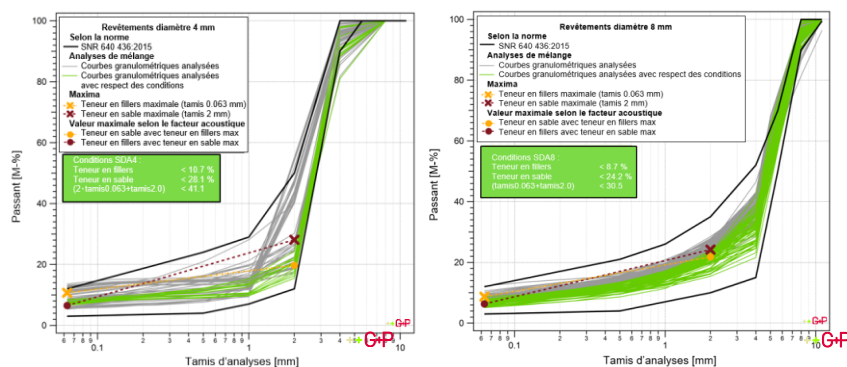
Version	Date	Auteurs	Description	Diffusion
V 1.0	18.02.2017	E. Bühlmann & E. Hammer	Projet	Division Génie Civil Canton d'AG, Nibuxs, Canton d'AG, OFEV
V 2.0	01.03.2017	E. Bühlmann & E. Hammer	Version finale	Commission de suivi
V 3.0	24.03.2017	E. Bühlmann & E. Hammer	Version finale révisée	Commission de suivi

RÉSUMÉ

La règle VSS SNR 640 436:2015 Mélanges et couches de roulement semi-denses a avec succès jeté les bases de l'usage généralisé des revêtements routiers peu bruyants à l'intérieur des localités. Les expériences faites dans le cadre du programme de recherche de la Confédération *Revêtements peu bruyants à l'intérieur des localités* ainsi que les analyses d'impact effectuées dans divers cantons sur des revêtements peu bruyants montrent que la performance acoustique des enrobés semi-denses peut très fortement varier, même à l'intérieur d'une même catégorie de diamètre maximal et de teneur en vide. La variabilité acoustique des recettes SDA individuelles s'explique notamment par des différences liées aux techniques de construction, qui se traduisent pour la couche posée par des écarts dans les propriétés mécaniques et physiques, qui ont des conséquences acoustiques.

Le présent projet vise principalement à identifier les paramètres mécaniques déterminants et, pour atteindre cet objectif, à fixer des critères clairs susceptibles d'assurer la performance acoustique à long terme des enrobés semi-denses. L'étude met l'accent sur les diverses recettes rencontrées dans le domaine des semi-denses (revêtements SDA normalisés et produits développés par les entreprises de construction), avec un diamètre maximal de 4 mm et 8 mm. À cette fin, un ensemble de données aussi vaste que possible se rapportant aux paramètres acoustiques et mécaniques des enrobés semi-denses déjà posés dans toute la Suisse a été évalué statistiquement et analysé.

Les analyses du présent projet ont montré de façon consistante que les revêtements avec une performance acoustique élevée se caractérisent tous par de faibles bruits dus à l'écoulement de l'air et donc par des vides accessibles depuis la surface. Les résultats montrent en outre que les vides accessibles depuis la surface dépendent essentiellement des teneurs en fillers et en sable de la recette. Lorsque ces vides sont colmatés par des teneurs en fillers et en sable, le revêtement peut encore présenter des teneurs en vide substantielles, qui ne sont toutefois pas accessibles depuis la surface, et ne sont donc pas efficaces d'un point de vue acoustique. On a déterminé pour la teneur en filler ainsi que pour la teneur en sable un maximum à ne pas dépasser pour pouvoir garantir que les vides restent accessibles depuis la surface. Par ailleurs, un facteur acoustique a été déterminé, qui comprend la relation entre la teneur en filler et la teneur en sable, et qui fonctionne comme condition supplémentaire pour des vides accessibles depuis la surface.



Dispositions d'exécution en matière d'acoustique pour la normalisation des enrobés semi-denses

Il s'agit d'assurer que la zone limite acoustique entre les recettes semi-denses et denses ne soit pas dépassée, et que l'accessibilité et le degré de liaison des vides ne sont pas limités, voire annihilés par un colmatage résultant de teneurs en fillers et en sable trop élevées. Les dispositions d'exécution en matière d'acoustique proposées pour la règle SNR 640436:2015 représentent une étape importante dans l'espoir de minimiser la teneur en vide des enrobés semi-denses tout en garantissant

leur performance acoustique et ainsi obtenir une durée de vie la plus longue possible pour les revêtements peu bruyants.

TABLE DES MATIÈRES

1.	CONTEXTE & PROBLÉMATIQUE	6
2.	BASE DE DONNÉES	6
2.1	Base de données principale des revêtements examinés	7
2.2	Paramètres analysés de la base de données principale	8
2.3	base de données de contrôle	9
3.	MÉTHODES	10
3.1	sélection et catégorisation des paramètres	10
3.2	Identification des paramètres déterminants	11
3.3	localisation des plages de valeurs optimales du point de vue acoustique	12
3.4	Détermination et vérification de la zone limite acoustique	12
3.5	Analyses volumétriques pour la détermination de la teneur en vide	12
4.	RÉSULTATS	14
4.1	Description des données	14
4.2	Paramètres déterminants du point de vue acoustique	20
4.3	Plages de valeurs optimales du point de vue acoustique	21
4.4	Relation entre la teneur en filler, la teneur en sable et l'acoustique	24
4.5	Zone limite acoustique pour avoir des recettes ayant des vides accessibles ou pas	25
4.6	Analyses volumétriques	28
5.	SYNTHÈSE	31
5.1	Enseignements pour les techniques de construction	31
5.2	Mode d'action acoustique	33
5.3	Recommandations pour l'efficacité acoustique des vides	33
6.	CONCLUSIONS	35
6.1	Principaux constats	35
6.2	Limites de l'Étude	35
6.3	besoins en recherche supplémentaires	36
7.	BIBLIOGRAPHIE	58
	ANNEXES	
1	Vue d'ensemble des métadonnées des analyses de carottes et de mélanges	39
2	Méthodes de mesurage In-situ	41
3	Relation entre les méthodes de détermination de la teneur en vide géométrique et hydrostatique	43
4	Analyse détaillée des modèles statistiques	44
5	Analyse détaillée des valeurs optimales	50
6	Analyse des valeurs optimales élargies	51

1. CONTEXTE & PROBLÉMATIQUE

La règle VSS SNR 640 436:2015 Mélanges et couches de roulement semi-denses a avec succès jeté les bases de l'usage généralisé des revêtements routiers peu bruyants à l'intérieur des localités. L'acronyme SDA désigne les *enrobés semi-denses* et il doit s'interpréter, conjointement aux indications se rapportant aux catégories de diamètre maximal et de teneur en vide, comme terme générique pour la nouvelle génération de revêtements peu bruyants. La règle autorise les propriétaires de routes à commander un revêtement routier peu bruyant auprès de l'entreprise de construction de leur choix et à vérifier ensuite que le mélange fourni et sa pose soient conformes aux exigences fixées dans la règle. Les premières expériences faites avec des recettes SDA ont été recensées dès 2010 déjà dans le « *Forschungspaket lärmarme Beläge innerorts Teilprojekt (TP3): Lanzeitmonitoring* » de la Confédération. Depuis, un grand nombre d'enrobés de type semi-dense ont été posés par différentes entreprises dans divers cantons.

Les expériences faites dans le cadre du programme de recherche « *Forschungspaket lärmarme Beläge innerorts Teilprojekt (TP3): Lanzeitmonitoring* » ainsi que les analyses effectuées dans divers cantons sur des revêtements peu bruyants montrent que la performance acoustique des revêtements SDA peut varier très fortement, même à l'intérieur d'une même catégorie de diamètre maximal et de teneur en vide. Le rapport final du programme de recherche souligne également qu'une optimisation ultérieure de la recette est nécessaire afin de garantir la performance acoustique des revêtements SDA. Ceci est un besoin central de la protection contre le bruit, qui doit pouvoir tabler sur une certaine performance acoustique des revêtements pour pouvoir les mettre en œuvre en tant que mesures de protection contre le bruit. La variabilité acoustique des recettes SDA s'explique par des différences liées aux techniques de construction, qui se traduisent pour la couche posée par des écarts dans les propriétés mécaniques et des différences concernant l'accessibilité des vides depuis la surface.

Le présent projet vise principalement à identifier les paramètres mécaniques déterminants et, pour atteindre cet objectif, à fixer des critères clairs susceptibles d'assurer la performance acoustique à long terme des enrobés semi-denses. L'étude met l'accent sur toutes les recettes rencontrées dans le domaine des semi-denses (revêtements SDA normalisés et produits développés par les entreprises de construction) et dotées d'un diamètre maximal de 4 mm et 8 mm. À cette fin, un ensemble de données aussi vaste que possible se rapportant aux paramètres acoustiques et mécaniques des enrobés semi-denses déjà posés dans toute la Suisse a été évalué statistiquement et analysé.

2. BASE DE DONNÉES

Le but de cette étude étant de créer une base de données aussi vaste que possible, elle a intégré aussi bien les revêtements SDA posés selon les normes que les produits développés par les entreprises de construction (solutions d'entreprise). De par leur recette et leur mode de construction, les solutions d'entreprise sont souvent très semblables aux revêtements SDA et remplissent fréquemment toutes les exigences fixées par la règle. Les critères de sélection des revêtements étudiés ici étaient la disponibilité d'analyses techniques de la couche de roulement localisables à petite échelle (analyses de mélanges et de carottes géoréférencées), de même que l'existence d'une série de mesurages acoustiques effectués sur plusieurs années avec la méthode de la remorque CPX, qui enregistre les diverses propriétés acoustiques des tronçons routiers.

Pour les revêtements ayant un diamètre maximal de 8 mm (revêtements de diamètre 8), beaucoup de données sont disponibles dans le canton d'Argovie (plus de 100 revêtements avec des mesurages acoustiques ainsi que des analyses de mélanges et de carottes). Pour les revêtements ayant un diamètre maximal de 4 mm (revêtements de diamètre 4), des données ont été obtenues d'autres cantons (Valais, Vaud et Genève) afin de pouvoir tirer des conclusions pertinentes pour des revêtements peu bruyants utilisés dans toute la Suisse.

Parallèlement à ces données principales, un ensemble de données de contrôle a été rassemblé pour vérifier les analyses statistiques des données principales et pour déterminer un facteur acoustique (voir chapitre 2.3).

2.1 BASE DE DONNÉES PRINCIPALE DES REVÊTEMENTS EXAMINÉS

La Figure 1 montre la distribution géographique des revêtements de diamètres 4 et 8 analysés dans le cadre de ce projet. Pour tous les revêtements, il existe au moins une analyse de carotte et une analyse de mélange, qui ont été fusionnés à petite échelle avec les données acoustiques des mesurages CPX. Les paramètres mécaniques et les propriétés acoustiques des revêtements peu bruyants sur le tracé pouvant varier, l'étude a été effectuée sur des carottes.

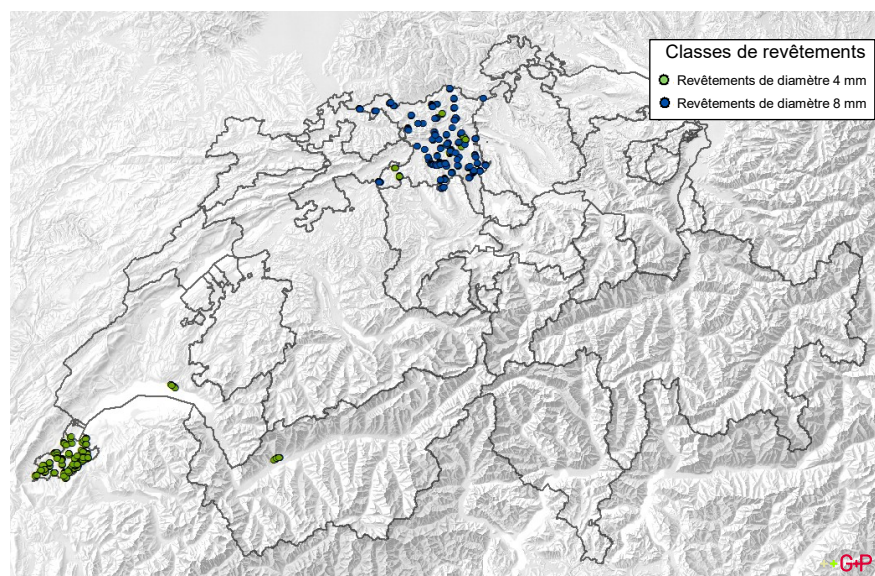


Figure 1 : Revêtements de diamètre 4 (en vert) et 8 (en bleu) examinés dans le cadre de ce projet

Le Tableau 1 présente le nombre de carottes analysées dans le cadre de ce projet pour chaque catégorie de revêtement avec la charge de trafic moyenne (trafic journalier moyen TJM et proportion moyenne de véhicules lourds). Comme la plupart des revêtements ont été utilisés comme mesure de protection contre le bruit sur des tronçons routiers fortement exposés au bruit, ils sont tous soumis à des volumes de trafic relativement élevés. En ce qui concerne les sollicitations mécaniques, c'est le nombre de passages de tous les véhicules qui est déterminant de même que la proportion des véhicules dont les charges par essieu sont élevées.

Tableau 1 : Nombre de données disponibles sur des revêtements et nombre de carottes par catégorie de revêtement avec la charge de trafic moyenne ainsi que les écarts types entre parenthèses

	Diamètre 4	Diamètre 8
Nombre de revêtements [-]	65	61
Nombre de carottes [-]	223	259
Ø TJM [nbre véh. / jour]	8'240 (±2'400)	5'720 (±3'910)
Ø part des véhicules lourds [%]	6.6 (±1.5)	6.3 (±2.6)

2.2 PARAMÈTRES ANALYSÉS DE LA BASE DE DONNÉES PRINCIPALE

Ce chapitre décrit tous les paramètres de la base de données principale qui ont été examinés et utilisés pour les analyses statistiques.

Tableau 2 : Paramètres analysés du lot de données principal

Paramètres de la pose	Paramètres du mélange	Paramètres du matériau
Teneur en vide (carotte)	Degré de remplissage des vides	Sensibilité à l'eau
Densité apparente (carotte)	Teneur en liant	Nature du liant
Épaisseur de la couche	Valeur de fluage	Type de fillers
Degré de compactage	Stabilité	Provenance des granulats
Humidité de l'air	Teneur en vide (Marshall)	
Vitesse du vent	Densité (Marshall)	
Température de l'air	Densité apparente (mélange)	
Pente	Tamis 0.063 mm / Fillers	
Entreprise de construction	Tamis 0.5 mm	
	Tamis 2 mm	
	Tamis 4 mm	
	Tamis 8 mm	
	Température du mélange	
	Module de Richesse	
	Durée du transport	
	Centrale d'enrobage	

2.2.1 PARAMÈTRES MÉCANIQUES

Pour les revêtements de diamètre 4, on dispose des analyses de mélanges et de carottes des cantons d'AG, GE, VD et VS. Pour les revêtements de diamètre 8, on a tenu compte dans cette étude des analyses de mélanges et de carottes ainsi que des analyses initiales de centrales d'enrobage effectuées dans le canton d'Argovie. Les données ont été géoréférencées pour toutes les carottes afin de les mettre en relation avec les données acoustiques locales. La carotte est donc la plus petite unité de la base de données, à laquelle sont reliées toutes les autres données. Comme les analyses des mélanges ne sont pas toutes disponibles avec le même niveau de détail, elles ont été associées aux carottes respectives en tant que valeur moyenne par tronçon de revêtement.

La liste de tous les paramètres mécaniques de l'analyse des carottes et des mélanges inclus dans le projet, ainsi que des analyses initiales est consultable à l'annexe 1.

2.2.2 DONNÉES CONCERNANT L'ACOUSTIQUE DES REVÊTEMENTS

À partir des séries de mesurages acoustiques effectuées sur plusieurs années avec la méthode de la remorque CPX de G+P AG, les bruits du contact pneu-chaussée ont été déterminés pour toutes les années mesurées 1) de manière spectrale et 2) en fonction de leur écart au modèle d'émission pour le bruit routier StL-86+utilisé en Suisse. Afin de déterminer les valeurs de mesurage CPX aux lieux de prélèvement des carottes, une valeur acoustique moyenne a été utilisée sur un segment de chaussée restreint de 10 m avant et après le lieu de prélèvement.

2.2.3 DONNÉES DU TRAFIC

Pour pouvoir analyser l'influence éventuelle de la charge de trafic sur le vieillissement acoustique des revêtements, on a extrait des données du réseau routier cantonal le trafic journalier moyen (TJM) ainsi que le pourcentage de véhicules lourds pour les routes où des carottes ont été prélevées. La pente du tronçon du revêtement correspondant a également été extraite des données du réseau routier cantonal et intégrée aux analyses statistiques.

Afin de disposer d'un paramètre pour le refroidissement éventuel du mélange durant le trajet de la centrale d'enrobage au chantier, la distance et le temps de transport ont été estimés à l'aide de GoogleMaps.

2.2.4 DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES

La température de l'air ambiant, l'humidité de l'air et la vitesse du vent durant la pose des revêtements pouvant avoir une influence sur la pose, ces trois paramètres ont été inclus dans la base de données principale. Le moment exact de la pose du revêtement n'étant malheureusement pas connu, nous avons calculé et utilisé la médiane des paramètres météorologiques correspondant à la date de pose pour les analyses statistiques.

2.3 BASE DE DONNÉES DE CONTRÔLE

Afin d'examiner et de vérifier les analyses statistiques avec un ensemble de données indépendant, on a eu recours à des données issues d'analyses acoustiques détaillées (effectuées par G+P AG) sur des revêtements SDA₄ et SDA₈ dans le canton d'Argovie, ainsi que du projet de recherche national TP₃ (voir Bühlmann et al. 2017). Les analyses se sont focalisées sur des données issues des mesurages de la résistance à l'écoulement de l'air sous cloche et sur la fréquence d'indicateur de 2'000 Hz des bruits du contact pneu-chaussée (mesurages CPX, Methode nach Bühlmann & Ziegler 2012).

Outre la vérification des analyses statistiques, le lot de données de contrôle a été utilisé pour décrire la relation entre les paramètres mécaniques déterminants et l'acoustique (voir chapitre 4.4), ainsi que pour déterminer la zone limite acoustique entre les recettes semi-denses et denses (voir chapitre 4.5).

3. MÉTHODES

Ce chapitre présente la démarche et les méthodes utilisées dans cette étude. La Figure 2 donne une vue d'ensemble de la procédure adoptée.

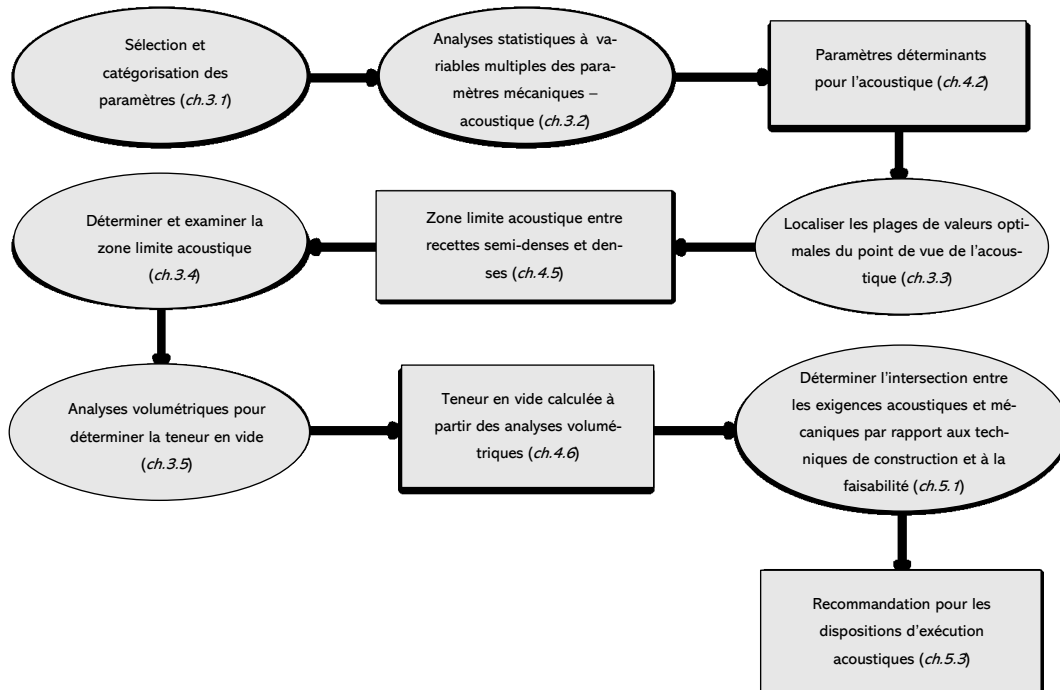


Figure 2 : Schéma du déroulement de l'analyse des données visant à déterminer les principaux paramètres pour des revêtements de diamètres 4 et 8 efficaces et durables. Les cercles désignent des processus et les rectangles les résultats/outputs qui en résultent.

3.1 SÉLECTION ET CATÉGORISATION DES PARAMÈTRES

Les paramètres analysés ont été sélectionnés en collaboration avec la commission de suivi de façon à éviter que des variables colinéaires viennent fausser les analyses statistiques. Ces paramètres ont été répartis en trois groupes : paramètres de la pose, paramètres du mélange et paramètres des matériaux. On a ainsi pu examiner spécifiquement quels paramètres de pose, du mélange ou des matériaux sont décisifs pour un effet acoustique à long terme d'un revêtement semi-dense.

On utilise comme paramètre acoustique déterminant la qualité acoustique du revêtement déterminée au moyen de mesures CPX pour la catégorie des voitures de tourisme. Les mesures CPX, hautement standardisées, se distinguent par une très bonne reproductibilité des résultats des mesurages, et garantit ainsi une bonne comparaison des performances acoustiques des revêtements (voir annexe 2 pour plus d'informations sur le procédé). Comme la reproductibilité est particulièrement bonne pour la catégorie des voitures de tourisme en raison de l'utilisation de pneus d'essai standardisés SRTT (ASTM F762 / F762M-08, 2014), les analyses présentées dans cette étude s'appuient exclusivement sur les valeurs de la catégorie des voitures de tourisme. C'est toutefois la valeur du trafic mixte qui est déterminante pour l'évaluation de la performance acoustique des revêtements dans l'exécution de mesures contre le bruit (la valeur pondérée entre les catégories de véhicules des voitures de tourisme et des camions). Pour pouvoir mieux situer la performance acoustique des revêtements examinés dans cette étude, celle-ci est comparée à la valeur d'un « bon » revêtement de la même catégorie et dans un état comparable. A cette fin et en tenant compte des

expériences faites dans le cadre du programme de recherche national *Lärmarme Beläge innerorts – TP3*, les valeurs suivantes ont été choisies (voir Tableau 3).

Tableau 3 : Critères de classification de la performance acoustique d'un revêtement à différents stades de son vieillissement (valeurs pour la catégorie de véhicules des voitures de tourisme)

	Neuf	1 an après la pose	3 ans après la pose	5 ans après la pose
Revêtements de diamètre 4	-6,5 dB	-5,5 dB	-4,5 dB	-3,5 dB
Revêtements de diamètre 8	-3,5 dB	-3,0 dB	-1,5 dB	-1,0 dB

Tous les revêtements qui correspondent aux critères du Tableau 3 ou qui présentent de plus grandes réductions de bruit sont attribués à la catégorie des « bons » revêtements. Tous les autres sont attribués à la catégorie des « mauvais » revêtements. Pour prendre en compte le changement acoustique dans la durée ou pour déduire les valeurs correspondant aux différents stades de vieillissement/états de conservation, on a posé les hypothèses suivantes :

Tableau 4 : Hypothèses pour l'évaluation d'un revêtement à différents stades de son vieillissement

	État neuf	1 an après la pose	3 ans après la pose	5 ans après la pose
Hypothèses	Impact acoustique avec : 1. Absorption du son 2. Aération due aux pores 3. Texture de surface intacte	Impact acoustique avec : 1. Absorption du son légèrement réduite 2. Aération due aux pores 3. Texture de surface intacte	Impact acoustique avec : 1. Peu d'absorption du son 2. Aération due aux pores 3. Texture de surface intacte	Impact acoustique avec : 1. Aération due à la rugosité 2. Texture de surface intacte

3.2 IDENTIFICATION DES PARAMÈTRES DÉTERMINANTS

Pour identifier les paramètres déterminants pour la performance acoustique, des modèles de régression linéaire à variables multiples ont été élaborés pour les revêtements de diamètres 4 et 8, respectivement à l'état neuf, 1 an, 3 ans et 5 ans après la pose. Outre ce modèle linéaire, un modèle logistique à variables multiples a aussi été testé, mais, le modèle linéaire global s'étant avéré suffisamment significatif, on travaille dans cette étude avec un modèle linéaire à variables multiples. A cet effet, les variables présélectionnées ont été prises comme données d'entrée pour le modèle. Les données acoustiques ont donc été intégrées au modèle comme des variables dépendantes, et les paramètres mécaniques comme des variables indépendantes. Pour l'analyse finale, la valeur indiquant la qualité du revêtement pour les voitures de tourisme (écart par rapport à StL-86+ pour N1) 3 ans après la pose a été prise comme variable acoustique dépendante. Ce jeu de données constitue un bon compromis puisqu'il tient compte de la durabilité de la performance acoustique en faisant référence à l'état le plus ancien disponible et provient d'un échantillon suffisamment large pour l'analyse des données. Pour l'inclusion des variables dans le modèle de régression linéaire à variables multiples, on a choisi la méthode de la sélection progressive pas-à-pas (*forward*). Dans cette méthode, les variables dépendantes sont progressivement intégrées dans le modèle, et celle qui présente la plus forte corrélation avec la variable acoustique (variable dépendante) est ajoutée en premier au modèle. La deuxième variable introduite est celle qui présente la deuxième corrélation partielle la plus élevée avec la variable acoustique. Cette étape est répétée jusqu'à ce que le coefficient de détermination (R^2) du modèle n'augmente plus de manière significative, ou jusqu'à

que toutes les variables aient été intégrées au modèle (Stahel, 2002). Les variables pour lesquelles les niveaux de significativité les plus élevés ont été déterminés constituent la base des analyses plus approfondies (voir aussi chapitre 3.3).

3.3 LOCALISATION DES PLAGES DE VALEURS OPTIMALES DU POINT DE VUE ACOUSTIQUE

Les paramètres admis comme déterminants pour la performance acoustique sont examinés pour trouver les plages de valeurs optimales qui garantissent une performance acoustique durable. On utilise pour cela la performance acoustique et la répartition des revêtements en catégories acoustiques (« bons » ou « mauvais ») 3 ans après la pose.

En raison de la problématique à variables multiples, des revêtements tant acoustiquement « bons » qu'acoustiquement « mauvais » peuvent exister pour chaque variable significative dans plusieurs plages de valeurs. Un test t à deux échantillons a donc été appliqué afin d'inclure d'autres grandeurs d'influence et définir plus précisément les optima locaux. Ce test vérifie si, dans le groupe échantillon, il y a une différence significative entre les valeurs moyennes de chaque paramètre individuel des « bons » et des « mauvais » revêtements. Si c'est le cas, la plage des valeurs optimales peut être élargie en conséquence en tenant compte d'un second paramètre.

3.4 DÉTERMINATION ET VÉRIFICATION DE LA ZONE LIMITE ACOUSTIQUE

Comme décrit au chapitre 2.3, on s'est appuyé sur un ensemble de données de contrôle pour vérifier et préciser les plages de valeurs optimales des paramètres déterminants déterminées avec des données indépendantes. On a utilisé pour ce faire des mesurages de la résistance à l'écoulement de l'air sous cloche et la bande de tiers d'octave d'une fréquence de 2'000 Hz des bruits du contact pneu-chaussée issus des mesurages CPX. Cette bande sert d'indicateur des bruits dus à l'écoulement de l'air permet ainsi de mettre en évidence les vides accessibles depuis la surface. Cette situation est décrite de façon détaillée dans Bühlmann & Ziegler (2012).

La teneur en vide dans la couche de roulement ne détermine pas à elle seule l'effet acoustique, il faut encore que les vides soient accessibles depuis la surface. À l'aide de ces deux procédés de mesure décrits (mesurages de la résistance à l'écoulement de l'air sous cloche et indicateur de bruits dus à l'écoulement de l'air), indépendants l'un de l'autre, et de l'ensemble de données indépendantes, on peut établir si les plages de valeurs optimales du point de vue acoustique déterminées, conduisent effectivement à des vides accessibles et sont à même de garantir la performance acoustique. La zone limite acoustique entre revêtements semi-denses (c. à d. avec des vides accessibles depuis la surface) et denses (c. à d. sans vides accessibles depuis la surface) peut ainsi être précisée à l'aide d'un échantillon complet (voir aussi chapitre 4.3).

3.5 ANALYSES VOLUMÉTRIQUES POUR LA DÉTERMINATION DE LA TENEUR EN VIDE

Dans cette étude, des plages de valeurs optimales du point de vue acoustique sont déterminées pour des paramètres mécaniques déterminants, qui doivent garantir une performance acoustique à long terme des revêtements SDA. Pour la normalisation des couches de roulement peu bruyantes, la teneur en vide recherchée du mélange est une grandeur cible essentielle. Les analyses volumétriques doivent déterminer la teneur en vide adéquate pour l'obtention de recettes qui remplissent les dispositions d'exécution acoustique et qui se situent dans la partie souhaitée de la zone limite acoustique.

L'interaction entre les courbes granulométriques et la teneur en liant est déjà connue. Il est cependant difficile de quantifier ces interactions et de les contrôler avec exactitude lors de la fabrication.

Le CRR (*Centre de Recherches Routières*) à Bruxelles a donc développé un logiciel de formulation des enrobés qui se base sur des analyses volumétriques. Cette méthode est décrite en détail dans le Code de bonne pratique pour la formulation des enrobés bitumineux, CRR R 69/97. PradoWin – l'outil logiciel associé – permet notamment de calculer la teneur en vide à partir d'une courbe granulométrique quelconque et de la teneur en liant associée. Il faut noter ici que le modèle ne donne pas d'indications sur le degré de réticulation et l'accessibilité des vides.

Les paramètres utilisés dans les analyses volumétriques sont listés ci-dessous :

- + L'analyse est effectuée séparément respectivement pour les revêtements de diamètre 4 et les revêtements de diamètre 8 pour la zone limite entre revêtements semi-denses et denses.
- + La teneur en vide calculée correspond à la zone limite entre revêtements semi-denses et denses, et peut être considérée comme une valeur cible pour garantir des revêtements avec des teneurs en vide les plus faibles possibles tout en assurant la performance acoustique.
- + Les paramètres pour les fractions brutes (fillers 0/2, 2/4 et 4/8) ont été extrapolés sur la base d'un précédent projet de Nibuxs et considérés comme représentatifs des revêtements suisses.
- + Lors des analyses, il a été admis que les granulats sont anguleux. Ce paramètre a une influence déterminante sur la teneur en vide et les propriétés mécaniques du revêtement.
- + Comme liant, un bitume modifié avec des polymères de type PmB-E4,5/80-65 a été choisi, liant qui est fréquemment utilisé pour des revêtements SDA.

4. RÉSULTATS

4.1 DESCRIPTION DES DONNÉES

Ce chapitre décrit les paramètres importants pour la pose des enrobés semi-denses (SDA) ainsi que leurs interactions.

4.1.1 PHYSIQUE

Les Figure 3 et 4 montrent les passants au tamis d'analyses utilisés. En même temps, les courbes granulométriques mesurées pour chaque revêtement sont représentées en gris, la zone du 10^e au 90^e percentile en vert clair / bleu clair, ainsi que la zone du 25^e au 75^e percentile pour les revêtements de diamètres 4 et 8 en vert/bleu.

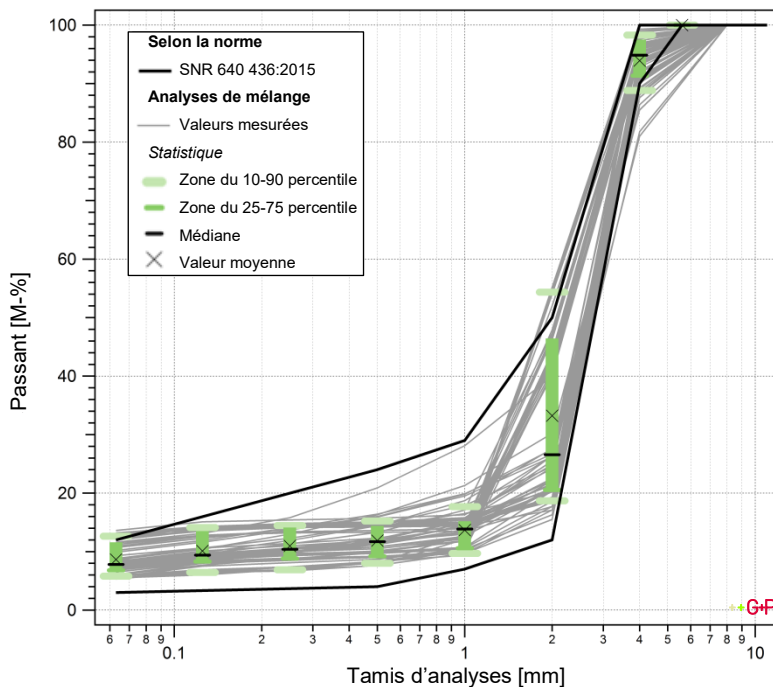


Figure 3 : Courbes granulométriques des revêtements de diamètre 4 analysés (en gris) avec la zone du 10^e au 90^e percentiles (en vert clair), la zone du 25^e au 75^e percentile (en vert), la valeur moyenne (x) et la médiane (-).

Il est constaté que certains des revêtements de diamètre 4 analysés étaient supérieurs respectivement inférieurs à la règle pour les passants au tamis d'analyses 0.063 mm (fillers) respectivement 4 mm. Ces écarts ont été observés pour les revêtements dans le canton d'Argovie. En outre, quelques revêtements de diamètre 4 ne remplissent pas les passants au tamis d'analyses 2 mm. Il s'agit exclusivement de revêtements Sapaphone® et Nanosoft® du canton de Genève et présentant une proportion relativement grande de passants au tamis d'analyses 2 mm. Les analyses statistiques montrent que les passants sont distribués normalement pour tous les tamis d'analyses, à l'exception du tamis d'analyses 2 mm. Des solutions d'entreprise s'écartant partiellement de la règle entraînent une distribution biaisée des passants. Lorsqu'on tient compte de la zone de tolérance de $\pm 1\%$ pour le tamis d'analyse 0.063 mm et de $\pm 3\%$ pour le tamis d'analyse 2 mm, presque toutes les courbes granulométriques satisfont à la règle SNR 640 436:2015.

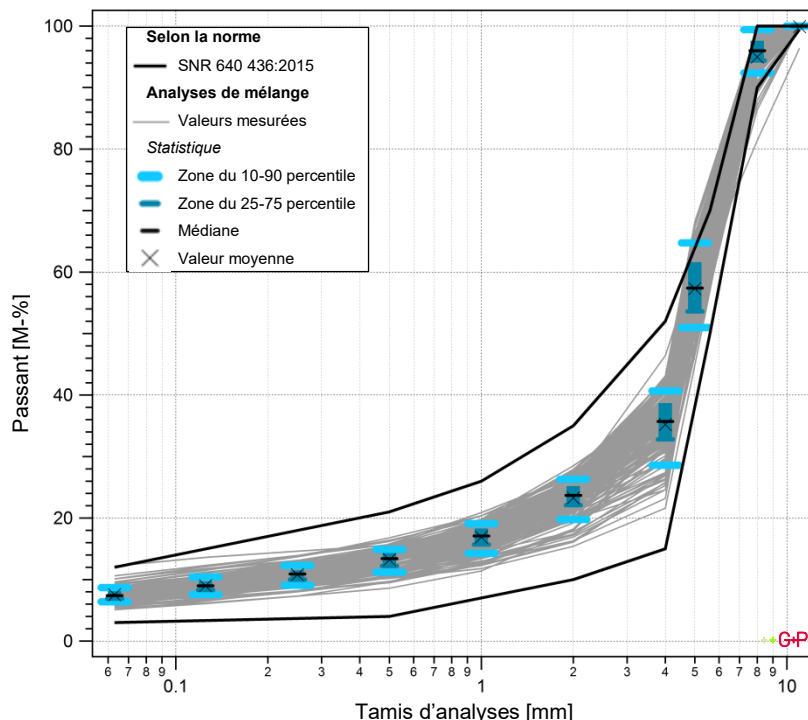


Figure 4 : Courbes granulométriques des revêtements de diamètre 8 analysés (en gris) avec la zone du 10^e au 90^e percentiles (en bleu clair), la zone du 25^e au 75^e percentile (en bleu), la valeur moyenne (x) et la médiane (-).

Certains des revêtements de diamètre 8 examinés dépassent la règle pour le passant au tamis d'analyses 5 mm. On constate également des dépassements pour le tamis d'analyses 8 mm dans un petit nombre de cas. Ces revêtements se trouvent exclusivement dans le canton d'Argovie. En tenant compte des zones de tolérance de ± 4 % pour les tamis d'analyses 4 mm et 8 mm, toutes les courbes granulométriques respectent la règle SNR 640 436:2015.

La Figure 5 représente des distributions des valeurs caractéristiques importantes des revêtements de diamètres 4 et 8. La teneur en vide des revêtements de diamètre 4 analysés se situe dans la zone entre 15 et 22 % (10^e et 90^e percentile) lorsqu'elle est mesurée sur carotte, et entre 12 et 22 % (10^e et 90^e percentile) lorsqu'elle est mesurée sur une éprouvette Marshall. Les teneurs en vide des revêtements de diamètre 8 analysés se situent entre 10 et 15 % sur carotte et entre 9 et 13 % sur éprouvette Marshall. On constate que tous les revêtements de diamètre 4 sont conformes à la règle SNR 640 436:2015 en ce qui concerne la teneur en vide (selon SNR 640 436:2015 sur carotte : 10 à 26 %, Marshall : 10 à 22 %). Pour les revêtements de diamètre 8, certains revêtements se situent légèrement en dessous des exigences de la règle quant à la teneur en vide (selon SNR 640 436:2015 sur carotte : entre 9 à 23 %; Marshall : entre 10 et 18 %). Il faut noter que, pour toutes les teneurs en vide comptabilisées, il s'agit de données volumétriques. Sur les tronçons où on ne dispose que de valeurs déterminées au moyen de méthodes hydrostatiques, celles-ci ont été converties en valeurs volumétriques (voir Relation entre les méthodes de détermination de la teneur en vide à l'annexe 3).

La teneur en liant pour les revêtements de diamètre 4 analysés se situe entre 5.1 et 6.4 %, et entre 5.4 et 6.0 % pour les revêtements de diamètre 8. Les enrobés semi-denses analysés sont ainsi peu nombreux à respecter la valeur indicative contenue dans la règle en ce qui concerne la teneur en liant minimale, qui est de 6 % pour SDA4 et de 5.8 % pour SDA8, mais la plupart d'entre eux se situent encore dans la zone de tolérance de ± 0.3 %. Il faut aussi souligner que les entreprises cher-

chent fréquemment à maintenir la teneur en liant la plus basse possible dans l'optique d'économiser des coûts. Lorsque la teneur en liant n'est pas atteinte, cela peut avoir des impacts négatifs sur la résistance mécanique de la couche de revêtement posée.

L'épaisseur de la couche des revêtements de diamètre 4 varie entre 28 et 44 mm et celle des revêtements de diamètre 8 entre 30 et 46 mm (différence entre le 10^e et le 90^e percentile). La moitié des revêtements de diamètre 4 ainsi que les trois quarts des revêtements de diamètre 8 sont ainsi conformes aux valeurs indicatives mentionnées dans la règle SNR 640 436:2015 en ce qui concerne l'épaisseur de la couche, qui doit être de 20 à 35 mm pour les revêtements SDA4, et de 25 à 40 mm pour les revêtements SDA8.

Le degré de compactage des revêtements de diamètre 4 analysés se situe entre 98 et 103 %, et celui des revêtements de diamètre 8 entre 96 et 101 %. La plupart de ces revêtements de diamètres 4 et 8 respectent ainsi les valeurs indicatives de la règle SNR 640 436 quant au degré de compactage de ≥ 97 %.

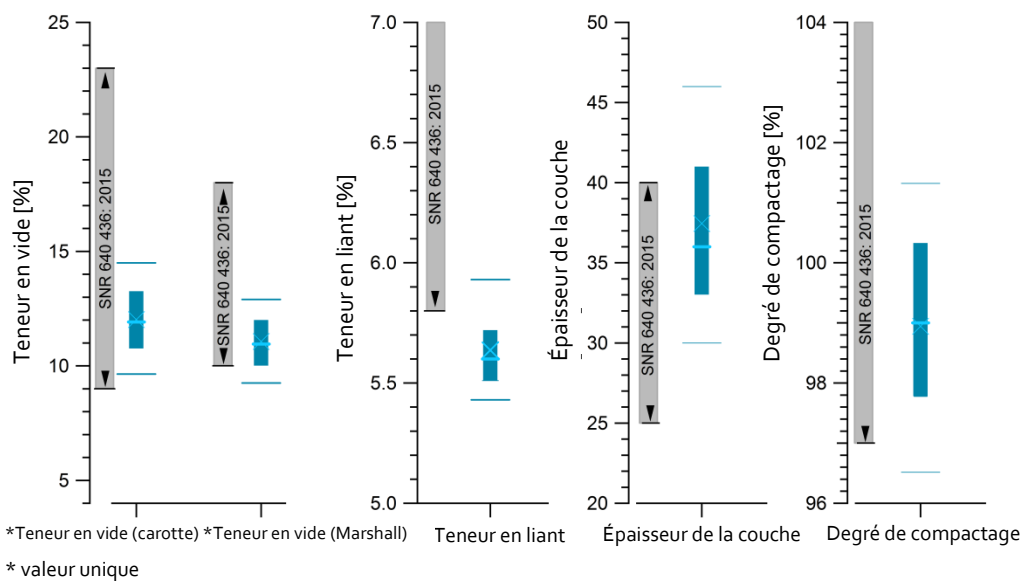
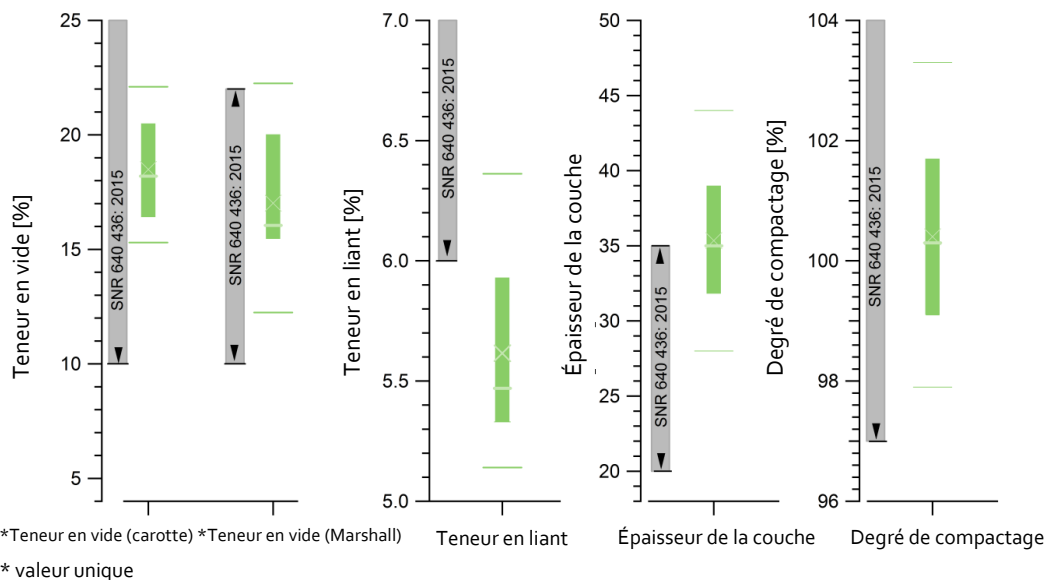


Figure 5 : Distribution statistique (10^e, 25^e, 75^e et 90^e percentiles, médiane [-] et valeur moyenne [x]) des données concernant la teneur en vide sur carotte et sur Marshall, la teneur en liant, l'épaisseur de la couche et le degré de compactage pour des revêtements de diamètre 4 (en haut, en vert) et de diamètre 8 (en bas, en bleu).

Le Tableau 5 récapitule toutes ces valeurs et montre également les valeurs moyennes et les écarts types de tous les paramètres décrits dans ce chapitre.

Tableau 5 : Valeurs moyennes, écarts types, 10^e et 90^e percentile des courbes granulométriques, teneur en liant, épaisseur de la couche, degré de compactage et teneur en vide sur carotte et sur Marshall à partir d'analyses de 248 mélanges et de 223 carottes de revêtements de diamètre 4 ainsi que d'analyses de 165 mélanges et de 259 carottes de revêtements de diamètre 8.

	Valeur moyenne		Écart type		10 ^e percentile		90 ^e percentile	
	4-er	8-er	4-er	8-er	4-er	8-er	4-er	8-er
Tamis 0.063 mm [%]	7.4	7.5	1.8	0.9	5.8	6.4	9.4	8.7
Tamis 0.125 mm [%]	8.7	9.0	2.1	1.1	6.5	7.6	12.6	10.4

Tamis 0.25 mm [%]	9.5	10.8	2.2	1.2	6.7	9.1	13.7	12.3
Tamis 0.5 mm [%]	10.4	13.2	2.3	1.5	7.7	11.2	14.4	14.9
Tamis 1 mm [%]	12.3	16.9	2.6	1.9	9.7	14.3	15.2	19.1
Tamis 2 mm [%]	39.6	23.3	13.0	2.6	18.4	19.8	54.4	26.3
Tamis 4 mm [%]	95.1	35.3	3.3	4.6	90.5	28.6	98.8	40.7
Tamis 5.6 mm [%]	-	57.8	-	5.2	-	51.0	-	64.7
Tamis 8 mm [%]	100	95.8	0.0	2.8	100	92.4	100	99.4
Tamis 11 mm [%]	100	99.9	100	0.7	100	100	100	100
Teneur en liant [%]	5.6	5.6	0.4	0.2	5.1	5.4	6.4	5.9
Épaisseur de la couche [mm]	35.3	37.5	6.0	6.7	28	30	44	46
Degré de compactage [%]	100.4	98.9	2.2	1.9	97.9	96.5	103.3	101.3
Teneur en vide carotte [%]	18.5	12.0	2.6	2.0	15.3	6.6	22.1	11.5
Teneur en vide Marshall [%]	17.0	11.0	3.5	1.6	12.2	6.3	22.3	9.9

4.1.2 ACOUSTIQUE

Afin de caractériser la performance acoustique, on a utilisé dans cette étude les valeurs indiquant la qualité du revêtement déterminées à l'aide de la méthode de mesurage de la remorque CPX pour la catégorie des voitures de tourisme (désignée ci-après par performance acoustique). Les valeurs de la qualité du revêtement se réfèrent au modèle d'émission du bruit routier StL-86+ appliqué en Suisse et indiquent l'écart avec celui-ci. La performance acoustique est indiquée pour plusieurs états (à l'état neuf, 1 an après la construction, ainsi que 3 et 5 ans après la pose) et s'applique aux propriétés du revêtement au lieu exact de prélèvement des carottes. La performance acoustique est indiquée pour tous les revêtements à l'état neuf et 3 ans après la pose, et comparée à la valeur attendue pour les « bons » revêtements (voir hypothèses au chapitre 3.1). Les données disponibles n'ont malheureusement pas permis de représenter des situations plus anciennes, car les séries de mesurage existantes au moment de l'étude n'étaient pas suffisamment longues. La Figure 6 montre la distribution de l'écart des valeurs de la qualité acoustique de tous les revêtements analysés par rapport modèle d'émission StL-86+ pour les voitures de tourisme (N1), les camions (N2) et le trafic mixte (avec 8 % de N2). On constate que la plupart des revêtements de diamètre 4 à l'état neuf peuvent être classés dans les « bons revêtements ». Les données des revêtements de diamètre 4 montrent que, 3 ans après la pose, la moitié d'entre eux peut encore être classée dans la catégorie des « bons revêtements ». En ce qui concerne les revêtements de diamètre 8 à l'état neuf, env. 30 % d'entre eux appartiennent à la catégorie des « bons revêtements ». Selon les données acoustiques disponibles sur les revêtements de diamètre 8, 3 ans après la pose, près de 75 % d'entre eux peuvent être mis dans la catégorie des « bons revêtements ». Au sujet de cette analyse, il faut noter qu'on ne dispose pas pour tous les revêtements mesurés à l'état neuf d'un mesurage 3 ans après la pose, et inversement.

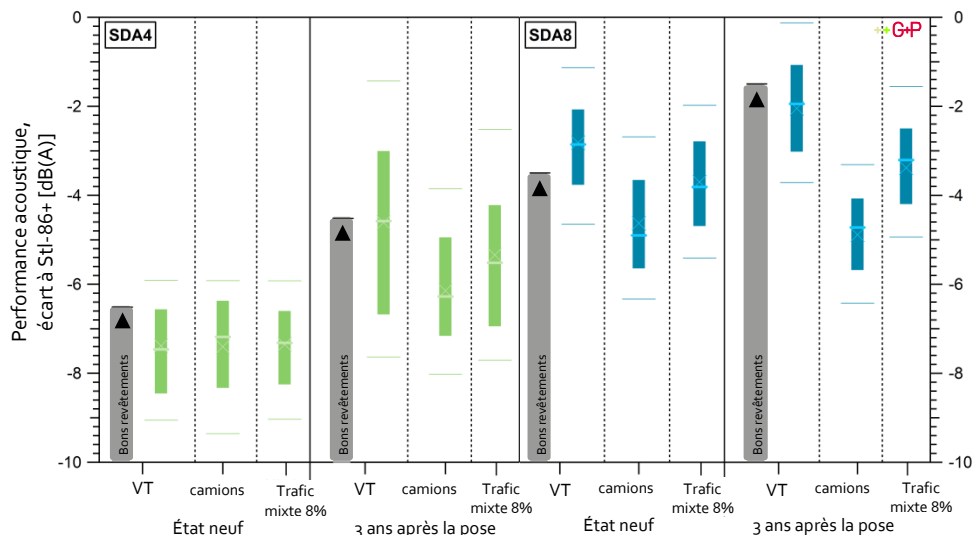


Figure 6 : Distribution statistique (10^e, 25^e, 75^e et 90^e percentiles, valeur médiane [-] et valeur moyenne [x]) des valeurs relatives à la qualité acoustique du revêtement sur carotte pour tous les revêtements de diamètre 4 (vert) et de diamètre 8 (bleu) analysés pour les voitures de tourisme (N1), les camions (N2) et le trafic mixte (comportant 8 % de N2).

Pour pouvoir quantifier l'évolution acoustique des revêtements de l'état neuf jusqu'à 3 ans après leur pose, les revêtements pour lesquels des valeurs de la qualité acoustique sont disponibles pour les deux catégories d'ancienneté ont été répartis en « bons » et en « mauvais » revêtements selon la méthode décrite au chapitre 3.1. Comme déjà mentionné, la performance acoustique de la catégorie des voitures de tourisme (N1) est utilisée comme paramètre acoustique déterminant pour les analyses menées dans le cadre de cette étude.

Le Tableau 6 indique le nombre relatif de revêtements de diamètre 4 « bons » ainsi que « mauvais » sur les lieux de prélèvement des carottes. Contrairement aux données représentées dans la figure 6, ces données-ci ne portent que sur les revêtements pour lesquels un mesurage CPX a été effectué à l'état neuf et 3 ans après la pose. On constate ainsi que près de la moitié (45 %) de tous les revêtements de diamètre 4 analysés présentent une bonne performance acoustique aussi bien à l'état neuf que 3 ans après la pose. Toutefois, 38 % de tous les revêtements de diamètre 4 analysés, qui présentaient une bonne valeur acoustique à l'état neuf, sont passés, 3 ans après la pose, dans la catégorie ayant de moins bonnes performances acoustiques. Seul 17 % des revêtements de diamètre 4 ont dû être attribués à la catégorie des « mauvais » revêtements déjà à l'état neuf ; parmi ceux-ci, 6 % présentent néanmoins une bonne performance acoustique 3 ans après la pose.

Tableau 6 : Évolution acoustique des revêtements de diamètre 4 sur les lieux de prélèvement des carottes de l'état neuf jusqu'à 3 ans après la pose, classés dans les catégories « bons » et « mauvais » revêtements selon la méthode du chapitre 3.1.

		3 ans après la pose	
		Bon	Mauvais
État neuf	Bon	45 %	38 %
	Mauvais	6 %	11 %

Le Tableau 7 reprend la même analyse que le tableau 6 mais pour les revêtements de diamètre 8.

Tableau 7 : Évolution acoustique des revêtements de diamètre 8 sur les lieux de prélèvement des carottes, de l'état neuf jusqu'à 3 ans après la pose, classés dans les catégories « bons » et « mauvais » revêtements selon la méthode du chapitre 3.1.

		3 ans après la pose	
		Bon	Mauvais
État neuf	Bon	38 %	5 %
	Mauvais	22 %	35 %

On voit ici que 38 % de tous les revêtements de diamètre 8 présentent une bonne performance acoustique aussi bien à l'état neuf que 3 ans après leur pose. Seul 5 % des revêtements changent de la catégorie « bon » à « mauvais » durant ce laps de temps. Toutefois, 35 % des revêtements de diamètre 8 présentent une performance acoustique plutôt mauvaise aussi bien à l'état neuf que 3 ans après la pose. 22 % des revêtements de diamètre 8 qui présentent une performance acoustique plutôt mauvaise à l'état neuf peuvent en fait être classés 3 ans après la pose dans la catégorie des « bons » revêtements. Les valeurs relativement élevées pour le changement de catégories de « mauvais » à « bon », et vice-versa, soulignent l'importance de fonder les analyses sur un état le plus tardif dont on puisse disposer (ici : 3 ans après la pose). Cela permet de mettre en évidence la longue durée de la performance acoustique, dans l'hypothèse où les revêtements « bons » du point de vue acoustique 3 ans après la pose se comportent également de façon stable.

4.2 PARAMÈTRES DÉTERMINANTS DU POINT DE VUE ACOUSTIQUE

Afin de déterminer la cause de la grande variabilité de l'efficacité acoustique des revêtements peu bruyants au cours de leur durée de vie, on a rassemblé l'ensemble des paramètres mécaniques disponibles concernant le mélange, la pose et les matériaux. Tous ces paramètres ont été pris comme variables indépendantes pour élaborer un modèle de régression linéaire à variables multiples, la variable dépendante étant la valeur de la qualité du revêtement 3 ans après la pose sur le lieu de prélèvement des carottes pour la catégorie des voitures de tourisme (voir chapitre 2.2). Le Tableau 8 dresse la liste de tous ces paramètres et montre en caractères gras les variables significatives qui résultent du modèle pour les revêtements de diamètres 4⁽⁴⁾ et 8⁽⁸⁾. On a choisi la valeur de la qualité du revêtement 3 ans après la pose, car celle-ci décrit les propriétés acoustiques des revêtements les plus anciennes pour lesquelles on dispose de suffisamment de données.

On constate au Tableau 8 qu'en ce qui concerne la valeur de la qualité acoustique du revêtement 3 ans après la pose, tant pour les revêtements de diamètre 4 que de diamètre 8, les paramètres les plus significatifs, en outre de quelques paramètres relatifs à la pose (teneur en vide sur carotte, épaisseur de la couche, vitesse du vent/température de l'air pendant la pose), sont principalement les paramètres relatifs au mélange (degré de remplissage des vides, valeur de fluage, teneur en vide en éprouvette Marshall, densité, durée du trajet de la centrale d'enrobage au chantier, tamis de 0.063mm et 2mm). Au vu des analyses de la performance acoustique à l'état neuf et 1 an après la pose, on observe que ce sont surtout les tamis 0.063 mm et 2 mm qui se révèlent significatifs et présentent des tendances cohérentes. C'est pourquoi, dans les pages qui suivent, l'étude se concentre sur ces deux paramètres relatifs à la granulométrie du mélange. Les résultats détaillés des modèles statistiques sont présentés à l'annexe 4.

La variable durée du trajet de la centrale d'enrobage au chantier a été décrite comme significative pour la performance acoustique des deux catégories de revêtements de diamètres 4 et 8. Cette

variable est très vraisemblablement colinéaire des variables température du mélange et plus largement de la température de l'air et de la vitesse du vent. Une explication possible pour cela est qu'un trajet prolongé par des faibles températures de l'air dans des véhicules de transport non protégés entraîne un refroidissement du mélange qui conduit à un degré de compactage qui n'est plus optimal.

Tableau 8 : Variables dépendantes utilisées dans le modèle de régression linéaire à variables multiples et variables significatives qui en résultent (en gras), réparties entre les paramètres de la pose, du mélange et de matériaux.

Paramètres de la pose	Paramètres du mélange	Paramètres des matériaux
Teneur en vide (carotte) ^{4,8}	Degré de remplissage ⁸	Sensibilité à l'eau
Densité apparente (carotte)	Teneur en liant	Nature du liant
Épaisseur de la couche ⁴	Valeur de fluage	Type de fillers
Degré de compactage	Teneur en vide (Marshall) ⁸	Provenance de la roche
Humidité de l'air	Densité (Marshall) ^{4,8}	
Vitesse du vent ⁸	Densité apparente (mélange)	
Température de l'air ⁸	Tamis 0.063 mm / fillers ^{4,8}	
Pente	Tamis 0.5 mm	
Entreprise de construction	Tamis 2 mm ⁸	
	Tamis 4 mm	
	Tamis 8 mm	
	Température du mélange ⁸	
	Durée du transport ^{4,8}	
	Centrale d'enrobage	

Variables significatives pour:

⁴: revêtements de diamètre 4

⁸: revêtements de diamètre 8

Les tamis d'analyses 0.063 mm et 2 mm ont été systématiquement identifiés comme significatifs pour la performance acoustique aux différents stades de vieillissement des deux catégories de revêtement de diamètres 4 et 8 (voir annexe 4). Ces deux tamis d'analyses peuvent avoir une influence déterminante sur la teneur en vide des éprouvettes Marshall et pourraient s'avérer colinéaires. Les tendances confirmées pour les différents stades de vieillissement amènent à focaliser les analyses ultérieures sur les deux paramètres principaux tamis 0.063 mm (fillers) et 2 mm (sable).

Tableau 9 : Significativité des paramètres principaux pertinents teneur en filler (passant 0.063 mm) et teneur en sable (passant au tamis 2 mm) dans les modèles de régression linéaire pour la performance acoustique aux différents stades de vieillissement du revêtement.

Stade de vieillissement du revêtement	Teneur en filler significative pour :		Teneur en sable significative pour :	
	Revêtements de diamètre 4	Revêtements de diamètre 8	Revêtements de diamètre 4	Revêtements de diamètre 8
Neuf	x			x
1 an après la pose	x	x	x	x
3 ans après la pose	x	x		x

4.3 PLAGES DE VALEURS OPTIMALES DU POINT DE VUE ACOUSTIQUE

Les variables significatives identifiées au chapitre 4.1.2 sont maintenant examinées en détail afin de déterminer les plages de valeurs optimales du point de vue acoustique pour ces variables. La Figure 7 montre la relation à deux variables entre la performance acoustique et la teneur en filler

pour les revêtements de diamètre 4. De plus, les valeurs qui outrepassent la valeur indiquée au chapitre 3.1 sont représentées par des triangles et celles qui sont inférieures à cette même valeur par des cercles. Les valeurs de l'indicateur des bruits dus à l'écoulement de l'air (voir chapitre 3.4) sont quant à elles représentées par des couleurs. Ces valeurs peuvent être considérées comme un indicateur des bruits dus à l'écoulement de l'air (Bühlmann & Ziegler, 2012).

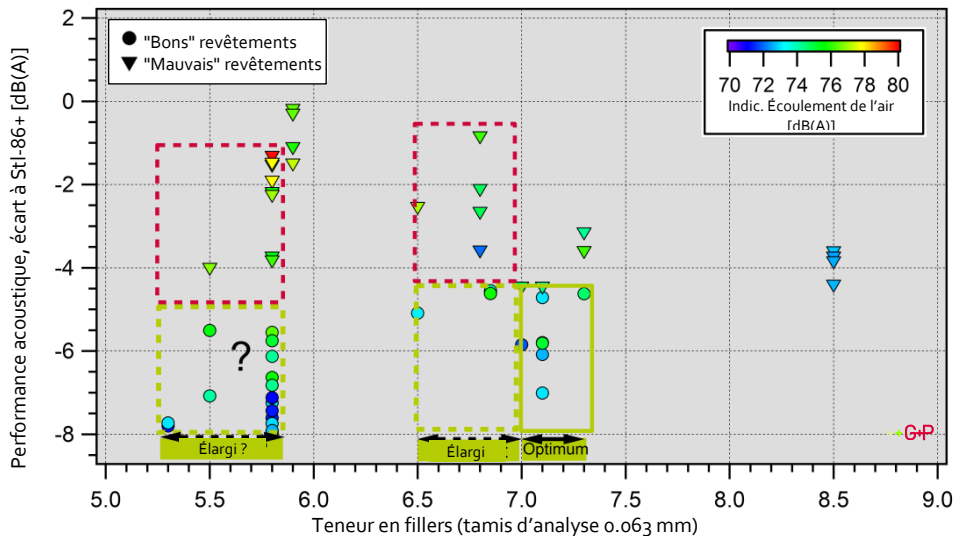


Figure 7 : Performance acoustique mesurée en fonction du passant au tamis d'analyses 0.063 mm (fillers) pour les revêtements de diamètre 4. Le code couleur représente l'indicateur des bruits dus à l'écoulement de l'air.

On peut supposer pour cette raison qu'il existe une relation entre les vides accessibles depuis la surface et l'indicateur des bruits dus à l'écoulement de l'air. Comme le montre la Figure 7, les revêtements avec des performances acoustiques plutôt faibles présentent aussi des valeurs élevées pour l'indicateur des bruits dus à l'écoulement de l'air. Ainsi, les « mauvais » revêtements présentent des vides moins accessibles que les « bons » revêtements.

On constate aussi que la majorité des revêtements présentant une teneur de 7 à 7.3 % de fillers se situent au-dessous de la valeur acoustique indiquée. On peut donc en supposer qu'un optimum concernant la teneur en filler existe dans cette zone. Lorsque la teneur en filler est plus faible, de 6.5 à 7.0 %, les revêtements se situent au-dessus ou au-dessous de la valeur acoustique indiquée (les revêtements pouvant être « bons » ou « mauvais »). Pour pouvoir expliquer cette différence, tous les paramètres disponibles de ces revêtements (paramètres de la pose, du mélange et des matériaux) ont été répartis en deux groupes (cercles et triangles), et soumis à un test t pour déterminer la différence (voir aussi chapitre 3.3). Le paramètre significatif ainsi mis en évidence est la teneur en vide. C'est pourquoi l'optimum élargi concernant la teneur en filler a été défini en admettant que la teneur en vide doit être inférieure à 18 % (voir annexe 5 pour l'identification de l'optimum de la teneur en vide) si on veut garantir une efficacité acoustique à long terme des revêtements peu bruyants de diamètre 4, ceci moyennant des conditions optimales de pose.

On sait que la teneur en vide découle de l'agencement du squelette. L'interaction entre la teneur en sable (à partir du tamis d'analyses 2 mm) et la teneur en filler est donc importante. La Figure 8 décrit la relation entre la teneur en sable (passant au tamis d'analyses 2 mm sans filler) et la performance acoustique des revêtements de diamètre 4. L'optimum qui en résulte pour la teneur en sable (sans filler) se situe entre 9 et 11 %. Pour un optimum élargi jusqu'à environ 13 %, la condition est que la teneur en filler soit inférieure à 7.3 % (voir aussi annexe 5).

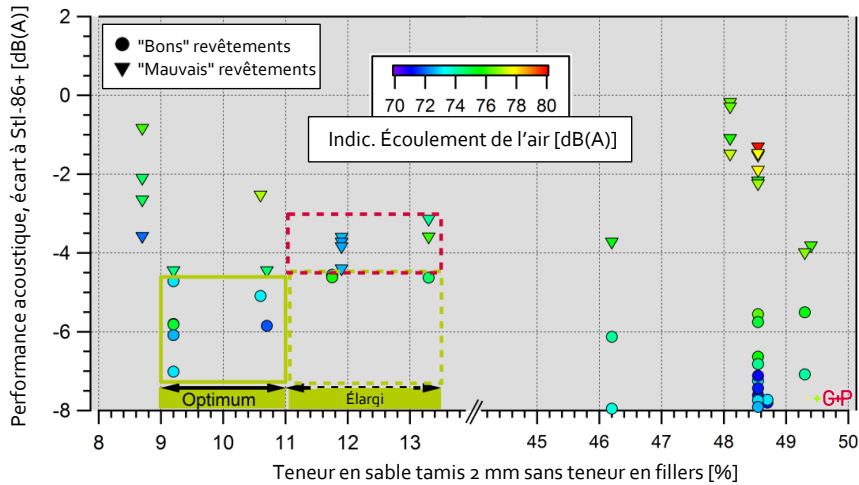


Figure 8 : Performance acoustique mesurée s'écartant de StL-86+ en fonction du passant au tamis d'analyses 2 mm sans teneur en filler à 0.063 mm pour des revêtements de diamètre 4. Le code couleur représente l'indicateur des bruits dus à l'écoulement de l'air.

La Figure 9 décrit la relation entre la teneur en filler et la performance acoustique et la Figure 10 la relation entre la teneur en sable (sans filler) et la performance acoustique pour les revêtements de diamètre 8. Les deux figures montrent clairement que les revêtements avec une performance acoustique plutôt faible présentent également des valeurs d'indicateur des bruits dus à l'écoulement de l'air élevées. En outre, il se dégage une tendance selon laquelle, plus la teneur en filler et en particulier la teneur en sable (sans filler) s'accroissent, plus la qualité acoustique du revêtement augmente. Cela confirme une fois de plus l'hypothèse selon laquelle la teneur en vide accessible a une influence déterminante sur une efficacité acoustique des revêtements de diamètres 4 et 8 sur le long terme. On notera qu'on trouve aussi parmi les revêtements de diamètre 4 comprenant une teneur en sable (sans filler) de plus de 48 % des « bons » revêtements du point de vue acoustique. Il s'agit ici pour la plupart de revêtements Nanosoft® et Sapaphone® qui, du fait de très faibles teneurs en fillers, présentent des teneurs en vide nettement plus élevées que les revêtements SDA examinés. Comme la présente étude se concentre sur les enrobés semi-denses, nous n'avons pas déterminé d'optima séparés pour ces extrêmes.

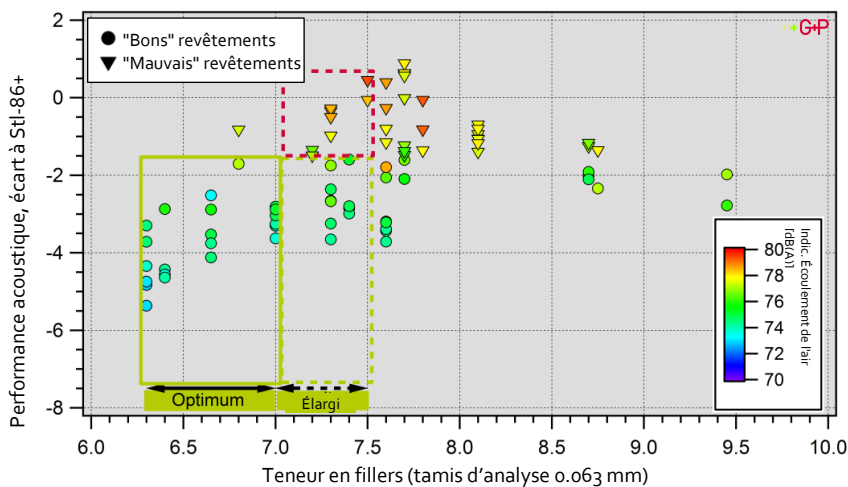


Figure 9 : Performance acoustique mesurée s'écartant de StL-86+ en fonction du passant au tamis d'analyses 0.063 mm pour des revêtements de diamètre 8. Le code couleur représente l'indicateur des bruits dus à l'écoulement de l'air.

La Figure 9 montre clairement un optimum dans la zone teneur en filler de 6.3 à 7 %. Il est à noter que la limite inférieure de 6.3 % est donc due au fait qu'il n'y a pas de valeurs plus faibles, ce qui indique le cas échéant un risque accru par rapport à la capacité de résistance mécanique. L'élargissement de l'optimum jusqu'à 7.5 % dépend de l'épaisseur de la couche, qui doit être inférieure à 40 mm, ainsi que de la teneur en vide sur carotte, qui doit être supérieure à 8.5 % (avec méthode hydrostatique) (voir analyses supplémentaires à ce sujet à l'annexe 6).

Pour la teneur en sable (passant au tamis d'analyses 2 mm sans filler) des revêtements de diamètre 8, l'optimum est également bien marqué et se situe dans une zone allant de 13 à 15 % (voir Figure 10). Un élargissement de l'optimum est envisageable jusqu'à 16 %, sous condition que la teneur en filler soit inférieure à 7.5 %.

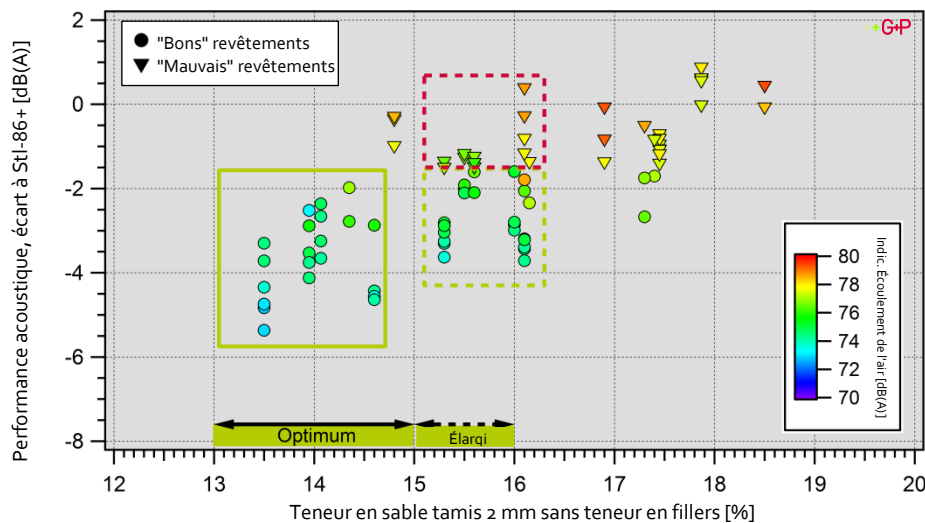


Figure 10 : Performance acoustique mesurée en fonction du passant au tamis d'analyse 2 mm sans teneur en filler pour les revêtements de diamètre 8. Le code couleur représente l'indicateur des bruits dus à l'écoulement de l'air.

On notera que toutes les plages de valeurs optimales du point de vue acoustique présentées dans ce paragraphe ont été dérivées d'un espace à deux variables. Etant donné qu'il est à prévoir que les deux variables teneur en filler et teneur en sable sont dépendantes l'une de l'autre pour influencer la performance acoustique, les plages de valeurs optimales telles qu'on les a déterminées ici doivent être considérées comme une sorte de zone minimale permettant dans la plupart des cas de bons résultats acoustiques, même si l'autre paramètre se situe à l'extérieur de la zone idéale. Cette situation est prise en compte au chapitre suivant.

4.4 RELATION ENTRE LA TENEUR EN FILLER, LA TENEUR EN SABLE ET L'ACOUSTIQUE

Comme on a pu le montrer au chapitre précédent 4.3, l'accessibilité des vides depuis la surface des enrobés semi-denses est garante d'une bonne efficacité acoustique. L'accessibilité des vides réduit les bruits dus à l'écoulement de l'air et est une condition sine qua non de l'effet phonoabsorbant du revêtement. Pour atteindre celui-ci, des valeurs « optimales » de la teneur en filler (passant au tamis d'analyses 0.063 mm) et de la teneur en sable (passant au tamis d'analyse 2 mm) ont été déterminées séparément à partir des données disponibles au sujet des revêtements de diamètres 4 et 8. Il faut maintenant chercher à mieux comprendre l'interaction entre teneur en filler, teneur en sable et acoustique. Cette analyse a été effectuée avec la base de données de contrôle décrite au chapitre 2.3.

Il est à supposer que les deux paramètres déterminants pour l'acoustique que sont la teneur en filler et la teneur en sable (sans filler) n'influencent pas dans une égale mesure l'acoustique et l'accessibilités des vides depuis la surface. Pour déterminer l'importance relative de ces paramètres, des modèles de régression linéaire à trois variables ont été élaborés entre la teneur en filler, la teneur en sable (sans filler) et les grandeurs acoustiques déterminantes, telles que l'effet de réduction du bruit, les bruits du contact pneu-chaussée à 2000 Hz (fréquence de l'indicateur des bruits dus à l'écoulement de l'air) et la résistance à l'écoulement de l'air. Pour les revêtements de diamètre 4, il s'ensuit une pondération relative de l'importance de la teneur en filler par rapport à la teneur en sable (sans fillers) de 3 :1 pour presque toutes les grandeurs acoustiques (voir aussi le Tableau 10). Cela signifie que l'influence de la teneur en filler sur l'acoustique est comparativement trois fois plus forte que celle de la teneur en sable (sans filler).

Pour les revêtements de diamètre 8, l'importance relative de la teneur en filler par rapport à la teneur en sable (sans fillers) est de 2:1 pour pratiquement toutes les grandeurs acoustiques. Ainsi, on peut supposer que la teneur en filler des revêtements de diamètre 8 a une influence deux fois plus importante sur l'acoustique et sur les vides accessibles depuis la surface. On notera qu'une faible teneur en filler peut avoir des effets négatifs du point de vue des techniques de construction (voir chapitre 5.1).

Tableau 10: Pondération de la teneur en filler et de la teneur en sable (sans filler) pour l'interaction teneur en filler-teneur en sable-acoustique

	Pondération	
	4 mm	8 mm
Teneur en filler	3	2
Teneur en sable (sans fillers)	1	1

4.5 ZONE LIMITE ACOUSTIQUE ENTRE LES RECETTES SEMI-DENSES ET DENSES

Il s'agit maintenant de définir la zone limite acoustique entre les recettes semi-denses et denses. Pour ces revêtements, on enregistre généralement une différence substantielle en ce qui concerne la performance acoustique. Pour que les vides dans le revêtement soient efficaces, ils doivent être accessibles depuis la surface. Dans cette étude, la zone limite est définie de telle manière que dans le revêtement correspondant il existe encore un minimum de vides accessibles depuis la surface, qui soient efficaces d'un point de vue acoustique. Lorsque cette zone limite est dépassée, le revêtement peut encore présenter des teneurs substantielles en vide, mais les vides ne sont plus en contact avec la surface ou colmatés. Le revêtement situé à l'extérieur de la zone limite se comporte d'un point de vue acoustique comme un revêtement dense et son impact acoustique est pratiquement réduit aux effets de la texture de la surface. Cette analyse a été effectuée avec le lot de données de contrôle décrit au chapitre 2.3.

Un procédé pour déterminer indirectement les vides accessibles depuis la surface est celui de la méthode de mesure de la résistance à l'écoulement de l'air sous cloche (voir annexe 2). On a ainsi cherché à trouver une relation entre la résistance à l'écoulement de l'air et l'acoustique, et plus particulièrement aux valeurs d'indicateur des bruits dus à l'écoulement de l'air (à partir de mesurages CPX), ceci sur la base de toutes les données des analyses effectuées par G+P sur des revêtements de diamètre 4 à l'état neuf. La relation entre ces deux paramètres a permis de déterminer une valeur limite acoustique pour les revêtements de diamètre 4 semi-denses (vides accessibles depuis la surface) et denses (vides inaccessibles depuis la surface).

Pour les revêtements de diamètre 8, les données disponibles (analyses effectuées par G+P) ne sont malheureusement pas suffisantes pour pouvoir procéder aux mêmes analyses que pour les revêtements de diamètre 4. Les données des mesurages CPX suffisent cependant pour pouvoir observer avec précision la relation entre la teneur en filler, la teneur en sable et les valeurs de l'indicateur des bruits dus à l'écoulement de l'air. Comme on le voit sur la Figure 10, cette relation présente une tendance très nette : l'augmentation de la teneur en sable (passant au tamis d'analyses 2 mm sans filler) conduit également à une augmentation de la valeur de l'indicateur des bruits dus à l'écoulement de l'air. En outre, des valeurs de l'indicateur élevées apparaissent plus fréquemment avec une teneur fillers élevée. Pour définir la zone acoustique critique des revêtements de diamètre 8, on s'est référé aux valeurs indicatives des valeurs de la qualité acoustique du revêtement définies au chapitre 3.1 pour les voitures de tourisme et on les a rapprochées de l'indicateur des bruits dus à l'écoulement de l'air. Une valeur limite acoustique a ainsi pu être déterminée pour les revêtements de diamètre 8 semi-denses (vides accessibles depuis la surface) et denses (vides inaccessibles depuis la surface).

À l'aide des constats faits au chapitre 4.4 concernant les valeurs limites acoustiques déterminées pour les bruits du contact pneu-chaussée avec une fréquence de l'indicateur des bruits dus à l'écoulement de l'air de 2'000 Hz et pour l'interaction entre teneur en filler ($S_{0.063mm}$) et teneur en sable ($S_{2.0mm}$), on définit un facteur acoustique qui doit concilier les propriétés acoustiques et techniques. Pour les revêtements de diamètre 4, ce facteur acoustique F_{4-er} est déterminé comme suit :

$$F_{4-er} = 3 \cdot S_{0.063mm} + 1 \cdot (S_{2.0mm} - S_{0.063mm}) \quad \text{Éq. 1}$$

ou sous forme simplifiée :

$$F_{4-er} = 2 \cdot S_{0.063mm} + S_{2.0mm} \quad \text{Éq. 2}$$

Pour les revêtements de diamètre 8, il résulte le facteur acoustique F_{SDA8} suivant :

$$F_{8-er} = 2 \cdot S_{0.063mm} + 1 \cdot (S_{2.0mm} - S_{0.063mm}) \quad \text{Éq. 3}$$

ou sous forme simplifiée :

$$F_{8-er} = S_{0.063mm} + S_{2.0mm} \quad \text{Éq. 4}$$

En exploitant les valeurs limites de l'indicateur pour les bruits dus à l'écoulement de l'air identifiées au chapitre 4.4 et les valeurs indicatives de la performance acoustique décrites au chapitre 3.1, il a été possible de définir des valeurs indicatives pour chacun des facteurs acoustiques F_{4-er} et F_{8-er} . En ce qui concerne les paramètres liés à la pose, au mélange et aux matériaux, pour qu'un revêtement de diamètre 4 puisse conserver sur le long terme des vides accessibles depuis la surface, la teneur en filler doit être inférieure à 10.7 %, la teneur en sable inférieure à 28.1 %, et le facteur acoustique F_{4-er} inférieur à 41.1. Il en résulte une teneur en vide d'au minimum 11 à 12 % mesurée sur éprouvette Marshall (méthode volumétrique).

En ce qui concerne les paramètres liés à la pose, au mélange et aux matériaux, pour un revêtement de diamètre 8 conserve des vides accessibles depuis la surface sur le long terme (et soit donc un revêtement efficace d'un point de vue acoustique), la condition suivante doit être remplie : la teneur en filler doit être inférieure à 8.7 %, la teneur en sable inférieure à 24.2 % et le facteur acoustique F_{8-er} inférieur à 30.5. Il en résulte une teneur en vide d'au minimum 9 à 12 % mesurée sur éprouvette Marshall (méthode volumétrique).

Les Figure 11 et 12 indiquent les teneurs maximales en fillers et en sable qui devraient être respectées pour avoir de bonnes valeurs de la qualité acoustique du revêtement sur le long terme pour les revêtements de diamètres 4 et 8. Ces valeurs sont en outre liées aux conditions de F_{4-er} et F_{8-er} mentionnées ci-dessus. Cela signifie que si on utilise le maximum de teneur en filler, le respect du facteur acoustique implique qu'on ne peut plus opter pour une teneur en sable maximale, et inversement.

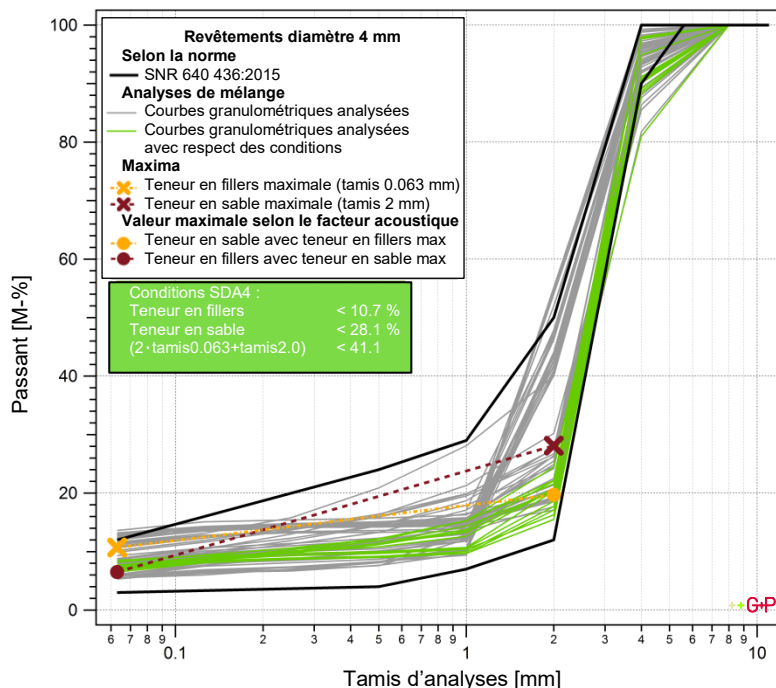


Figure 11 : Courbes granulométriques des revêtements de diamètre 4 analysées avec le minimum et le maximum fixés par la règle SNR 640 436:2015 pour la valeur limite. Les croix signalent les valeurs maximales pour les teneurs en fillers (en jaune ; passant au tamis 0.063 mm) et en sable (en rouge ; passant au tamis 2.0 mm) sous condition que $F_{4,er} < 41.1$. Les courbes granulométriques en vert clair remplissent les conditions.

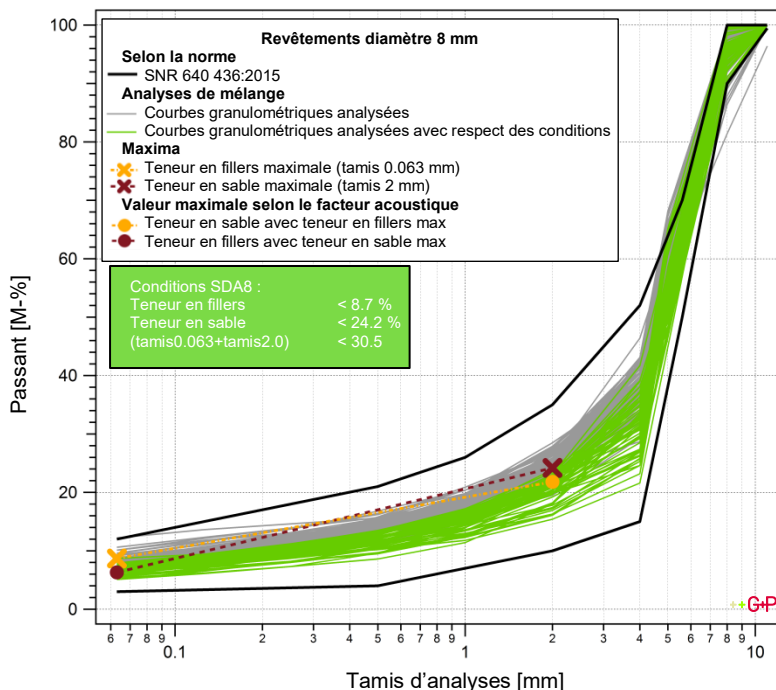


Figure 12 : Courbes granulométriques des revêtements de diamètre 8 analysées avec le minimum et le maximum fixés par la règle SNR 640 436:2015 pour la valeur limite. Les croix signalent les valeurs maximales pour la teneur en filler (en jaune ; passant au tamis 0.063 mm) et la teneur en sable (en rouge ; passant au tamis 2.0 mm) sous condition que $F_{8,er} < 30.5$. Les courbes granulométriques en vert clair remplissent les conditions.

4.6 ANALYSES VOLUMÉTRIQUES

Dans la présente étude, on a déterminé des plages de valeurs optimales du point de vue acoustique pour les paramètres du mélange déterminants, afin de garantir une performance acoustique durable des revêtements SDA. La teneur en vide du mélange souhaitée est souvent une valeur cible essentielle pour la normalisation des couches de roulement peu bruyantes. Les analyses volumétriques doivent permettre de déterminer la teneur en vide adéquate pour des recettes qui correspondent aux dispositions d'exécution en matière d'acoustique et qui se situent du côté souhaité de la zone limite semi-dense/dense. Comme décrit au chapitre 3.5, le principe des calculs volumétriques réalisés ici consiste à déterminer une courbe granulométrique et une teneur en liant, pour ensuite déterminer la teneur en vide du revêtement avec un degré de compactage variable. On notera que le logiciel de calcul est conçu sur la base d'un granulat belge dont les propriétés peuvent par conséquent se comporter de façon légèrement différente des matériaux en Suisse. Selon les expériences faites par Nibuxs avec cette méthodologie, il convient donc de considérer en règle générale les valeurs comme relatives, car les valeurs absolues obtenues en laboratoire peuvent s'écarter du modèle. Cette procédure d'analyse est particulièrement appropriée pour quantifier les effets des différents paramètres, et ultérieurement pour optimiser la formulation.

Les Figure 13 et 14 montrent les effets des degrés de compactage sur la teneur en vide sur carotte pour les revêtements SDA₄ et SDA₈. On peut observer une différence non négligeable de près de 5 % de la teneur en vide entre un faible degré de compactage (98 % Marshall) et un degré de compactage relativement élevé (102 % Marshall). Compte tenu de la faible épaisseur de la couche des revêtements SDA₄ et SDA₈, le compactage est une étape importante et particulièrement complexe à bien effectuer pour les fabricants. Ainsi, les conditions météorologiques optimales et le recours à des collaborateurs expérimentés jouent souvent un rôle important.

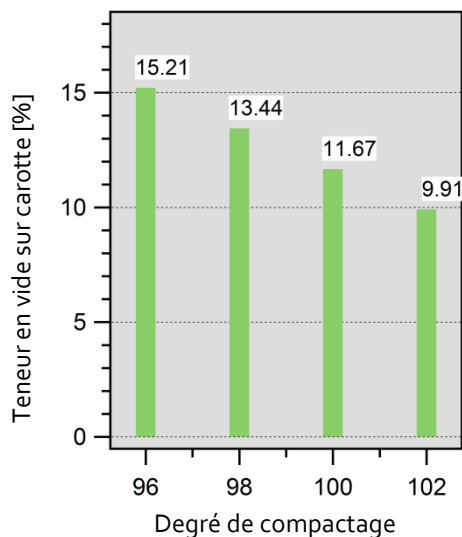


Figure 13 : Teneur en vide sur carotte en fonction du degré de compactage pour les revêtements SDA₄

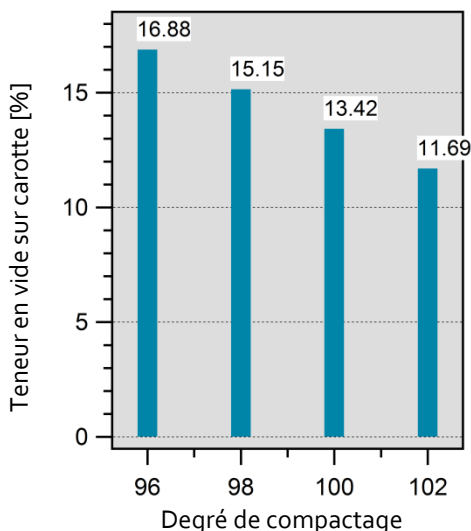


Figure 14 : Teneur en vide sur carotte en fonction du degré de compactage pour les revêtements SDA8

Pour les revêtements SDA₄ et SDA₈, il est important de contrôler la teneur en filler (passant au tamis 0.063 mm) dans la structure de la matrice. La Figure 15 montre quels effets une faible modification de la teneur en filler peut avoir sur la teneur en vide des revêtements SDA₄. On constate généralement qu'une augmentation de la teneur en filler peut entraîner une réduction de la teneur en vide. Il faut noter que les passants aux tamis d'analyses 0.25 mm et 0.5 mm doivent être légèrement modifiés afin de pouvoir obtenir des courbes granulométriques cohérentes pour les teneurs en filler de 3 %, 7.3 %, 10 % et 12 %. Cela peut avoir une légère influence sur le calcul de la teneur en vide. Dans tous les cas, une modification de la teneur en filler de 1 % peut se traduire par une modification de même ampleur de la teneur en vide.

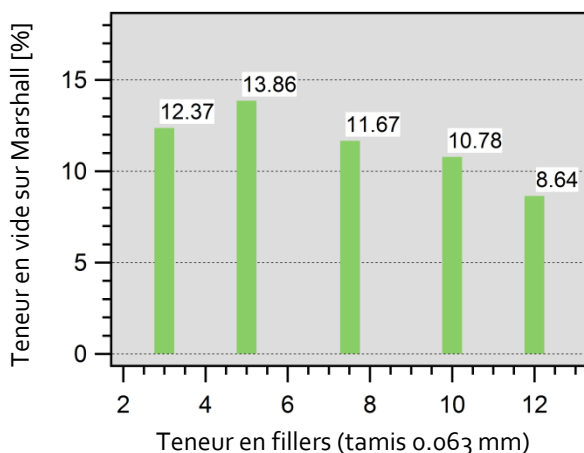


Figure 15 : Impact de la teneur en filler sur la teneur en vide en éprouvette Marshall pour les revêtements SDA₄

Pour mieux comprendre l'impact des limites des courbes granulométriques fixées par la règle, un modèle a été élaboré avec les courbes granulométriques minimales et maximales selon SN 640 436:2015. Les résultats sont présentés au Tableau 11 et montrent la teneur en vide calculée pour les revêtements SDA₄ et SDA₈. Celle-ci présente une différence de près de 20 % entre la courbe granulométrique minimale et maximale. Bien que ces cas ne soient guère envisageables dans la pratique, il met en évidence la zone significative qui peut être atteinte tout en respectant les courbes granulométriques fixées par la règle SN 640 436:2015.

Tableau 11 : Calcul de la teneur en vide pour le minimum et le maximum selon SNR 640 436:2015. Le calcul a été établi pour un degré de compactage de 100 % et un squelette SDA (teneur en vide n'a pas été validée). La teneur en liant est de 6.0 % pour le SDA₄ et de 5.8 % pour le SDA₈.

	Teneur en vide calculée [%]	
	SDA ₄	SDA ₈
Avec courbe granulométrique minimale	26.0	26.4
Avec courbe granulométrique maximale	6.7	2.2

Le Tableau 11 montre que, tout en respectant les courbes granulométriques de la SNR 640 436:2015, un grand nombre de recettes sont possibles, allant de très poreuses (avec teneur en vide d'env. 26 %) à presque denses (avec teneurs en vide d'env. 2 à 7 %).

5. SYNTHÈSE

5.1 ENSEIGNEMENTS POUR LES TECHNIQUES DE CONSTRUCTION

5.1.1 EXIGENCES MÉCANIQUES

Les chapitres précédents étaient dédiés à l'aspect de l'optimisation des enrobés semi-denses sur le plan de l'acoustique. Il faut désormais aussi prendre en compte les aspects mécaniques afin de garantir que les enrobés soient réalisables du point de vue des techniques de construction, et qu'ils soient efficaces mécaniquement. En principe, les enrobés semi-denses doivent toujours remplir plusieurs fonctions de base : en plus de si possible avoir des propriétés acoustiques, ils doivent garantir une adhérence suffisante, protéger les couches inférieures/de l'infrastructure, avoir une résistance structurelle suffisante et offrir une certaine durée de vie. Pour remplir au mieux toutes ces exigences, de bonnes propriétés mécaniques à long terme sont indispensables.

La qualité du mastic est un facteur déterminant pour la durée de vie du revêtement. Elle est notamment caractérisée par le « module de richesse » (voir annexe 1). En règle générale, une valeur du « module de richesse » suffisamment élevée garantira un meilleur comportement à basse température et une bonne adhérence entre le liant et les agrégats. Si la valeur du « module de richesse » est trop élevée, le mélange peut devenir plus sensible aux déformations permanentes (par ex. formation d'ornières).

Le filler joue un rôle essentiel dans le comportement mécanique des matériaux bitumeux, car il garantit, en association avec le liant, la liaison entre les agrégats. D'un point de vue mécanique, le filler augmente la qualité de la liaison entre les granulats et réduisent le risque de formation de fissures. En même temps, des teneurs trop élevées en fillers augmentent le risque de formation d'ornières. En général, la teneur en filler doit toujours être considérée en relation avec la teneur en liant (par exemple via le « module de richesse »). Le mastic (fillers + liant) joue aussi un rôle important du point de vue acoustique par l'influence qu'il a sur la texture et l'accessibilité des vides. Le mastic est constitué en majeure partie de fillers et il n'est donc pas étonnant que le degré de remplissage et la teneur en liant apparaissent au nombre des paramètres déterminants au chapitre 4.2.

La teneur en sable (sans fillers) joue également un rôle important en ce qui concerne la structure du vide : on admet qu'une structure de vide efficace d'un point de vue acoustique ainsi que son degré de liaison dépendent clairement des granulométries moyennes (principe de la géométrie fractale). Dans le même temps, la teneur en sable constitue un élément important entre l'agrégat grossier et le mastic.

On peut en conclure qu'une teneur en vide d'environ 14 à 15 Vol-% se situant juste au-dessus de la zone limite acoustique entre semi-dense et dense représente un bon compromis entre l'acoustique et la mécanique. A cet effet, il faut toutefois veiller à un appui aussi bon que possible du squelette. Ce sujet est traité plus en détail au chapitre suivant.

5.1.2 EXIGENCES EN MATIÈRE DE SQUELETTE

Comme expliqué au chapitre 5.1.1, les fractions granulométriques moyennes (comme la teneur en sable) remplissent une fonction essentielle pour garantir une structure de vide communicante qui soit efficace sur le plan acoustique. Pour éviter les déformations permanentes et la formation d'ornières, on cherche en général autant que possible des granulométries moyennes afin de conférer une bonne assise au squelette (voir Figure 16).

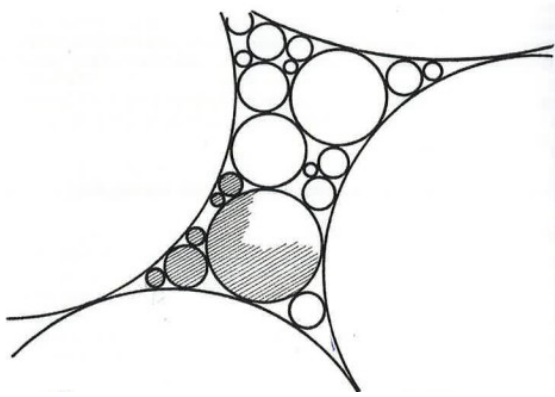


Figure 16 : Squelette d'un enrobé contenant peu de vide, idéal du point de vue des techniques de construction (source : Hintsteiner, 1996)

Le système de la Figure 16 présentant des granulométries continues, idéal du point de vue des techniques de construction, est de ce fait fréquemment utilisé dans la construction des routes (Hintsteiner, 1996). Pour les enrobés semi-denses, on utilise fréquemment des granulométries discontinues. Le réseau de vides qui en résulte entre les matériaux minéraux n'est que partiellement comblé par le mastic et les granulométries moyennes, et garantit ainsi la communicabilité des vides. Lors de l'optimisation acoustique des enrobés semi-denses, il faudrait cependant toujours veiller à ce que les granulats de taille moyenne soient présents en suffisance malgré des granulométries discontinues, pour qu'il en découle un squelette stable conférant à l'enrobé une rigidité élevée recherchée et une faible sensibilité aux déformations permanentes.

5.1.3 CONSIDÉRATIONS PRATIQUES

Si, en raison de circonstances acoustiques, une adaptation de la règle en vigueur devait avoir lieu, les aspects pratiques liés à la fabrication du mélange doivent également être pris en compte. La fabrication du mélange résulte généralement d'un processus contrôlé par un dispositif électronique, au cours duquel les composants individuels de l'enrobé sont choisis et mélangés. La qualité et l'homogénéité de la matière première sont déterminantes. Par exemple, la teneur en filler naturelle des différents composants est très importante, tout comme la capacité de la centrale d'enrobage de séparer le filler à l'aide d'une installation de dépoussiérage et d'en réintroduire si nécessaire ultérieurement à petite dose dans le mélange. Le dosage de la teneur en sable doit être tout aussi précis, celui-ci nécessitant cependant un tamis de maillage 2 mm, dont les installations d'enrobage en Suisse ne sont pas toutes équipées pour le moment. En outre, les propriétés pétrographiques des granulats changent au cours d'une même saison de pose, d'une part pour des raisons liées à l'homogénéité de la matière première, et d'autre part liées aux conditions de stockage et de transport. Ces facteurs compliquent le travail des centrales pour contrôler avec exactitude la teneur en filler et en sable.

La présente étude montre qu'un contrôle aussi précis que possible de la teneur en filler et en sable revêt une grande importance pour l'optimisation acoustique des enrobés semi-denses. Il y a principalement deux manières de prendre en compte cet état de fait dans la normalisation : d'une part, on peut établir des exigences supplémentaires concernant le contrôle des teneurs en filler et en sable dans le processus de fabrication des enrobés semi-denses, ce qui génère potentiellement des coûts de fabrication trop élevés. D'autre part, on peut tenir compte des contraintes d'ordre pratique de la fabrication du mélange en admettant des marges de tolérance appropriées.

5.2 MODE D'ACTION ACOUSTIQUE

Les analyses des plages de valeurs optimales du point de vue acoustique du chapitre 4.2 montrent de façon consistante que tous les revêtements fournissant une « bonne » performance acoustique sont caractérisés par de faibles bruits dus à l'écoulement de l'air qui traduisent la présence de vides accessibles depuis la surface. Ce constat est important dans la mesure où les analyses portent non pas sur l'état neuf mais sur l'état trois ans après la pose. On peut conclure que des revêtements semi-denses, soumis à de fortes charges de trafic, qui présentent des propriétés intactes 3 ans après la pose, ne peuvent pas changer subitement ; il peut donc être conclu que des « bons » revêtements et des revêtements acoustiquement durables ont ceci en commun : des vides accessibles depuis la surface, qui assurent de faibles bruits dus à l'écoulement de l'air et un certain niveau d'absorption du son.

Lorsque ces vides sont colmatés par du filler et du sable, le revêtement peut continuer à présenter des teneurs en vide importantes, mais ce vide n'est cependant pas accessible depuis la surface. À l'état neuf, de tels revêtements fournissent parfois des performances acoustiques comparables à celles des « bons » revêtements d'un point de vue acoustique. Néanmoins, ces performances acoustiques à l'état neuf sont dues à une texture de surfaces plus fine (due à des teneurs en fillers et en sable élevées). Avec le temps, les fines situées à la surface sont abrasées par les sollicitations mécaniques du trafic roulant. L'abrasion des fines engendre une diminution considérable de la performance acoustique déjà dans la première année après la pose. Ce qui demeure est la texture de surfaces plus rugueuse due à l'agrégat, qui conduit à une baisse significative de la performance acoustique (on observe aussi ceci avec les recettes AC).

La performance acoustique des « bons » revêtements diminue elle aussi avec le temps, mais beaucoup moins rapidement pour les revêtements présentant des teneurs élevées en fillers et en sable. Les dépôts de poussière, qui peuvent au fil du temps réduire l'accessibilité des pores, sont responsables de la diminution de la performance acoustique. Comme la texture de surfaces déterminante pour l'acoustique des « bons » revêtements est dès le départ due à l'agrégat, aucune modification essentielle de la texture de ces revêtements n'est à prévoir aussi longtemps que celle-ci reste intacte. La situation décrite ici est illustrée par l'exemple suivant provenant du canton d'Argovie (voir Figure 17).

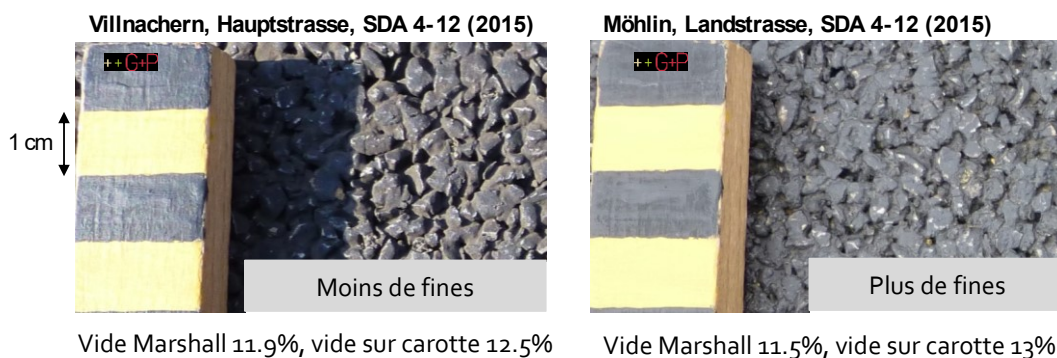


Figure 17 : Exemple de la texture de surfaces de deux revêtements SDA 4 comportant des teneurs en vide équivalentes mais des teneurs en fines différentes.

5.3 RECOMMANDATIONS POUR LES DISPOSITIONS D'EXÉCUTION ACOUSTIQUES

Pour les revêtements PA, l'efficacité acoustique des vides du mélange peut être directement liée à sa teneur en vide. Pour les enrobés semi-denses, le mode d'action acoustique est plus complexe :

les résultats du projet de recherche national ont signalé que des recettes semi-denses peuvent présenter des performances acoustiques très différentes malgré une teneur en vide similaire. La présente étude montre que cela s'explique par des différences dans l'accessibilité des vides depuis la surface, qui dépend essentiellement des teneurs en fillers et en sable de la recette. Il faut tenir compte de l'importance de l'accessibilité des vides depuis la surface si l'on veut garantir la performance acoustique des enrobés semi-denses. Il s'agit alors de veiller à ce que la zone limite acoustique entre recettes semi-denses et denses ne soit pas dépassée, et que l'accessibilité et la communicabilité des vides ne soient pas réduites ou complètement anéanties par un colmatage dû à des teneurs trop élevées en fillers et en sable. On peut envisager d'en tenir compte dans la normalisation avec le complément ci-dessous pour l'exécution acoustique des enrobés semi-denses (voir Figure 18).

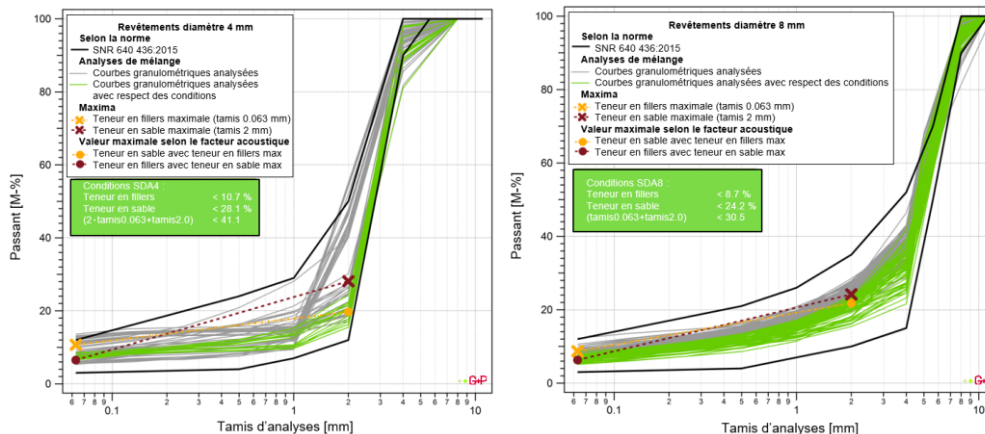


Figure 18 : Dispositions d'exécution en matière d'acoustique recommandées pour la normalisation des enrobés semi-denses. Celles-ci comprennent des valeurs maximales pour les teneurs en fillers et en sable (croix vertes) qui, parallèlement au critère pour le facteur acoustique (encadré vert), ne doivent pas être dépassées pour garantir l'efficacité acoustique des vides.

Au vu des résultats de cette étude et des exigences mécaniques posées aux enrobés semi-denses (voir chapitre 5.1), on peut en déduire qu'une teneur en vide d'environ 14 à 15 Vol-% en éprouvette Marshall, se situant juste au-dessus de la zone limite acoustique entre semi-dense et dense, représente un bon compromis entre l'acoustique et la mécanique. La teneur en vide minimale pour garantir la performance acoustique se situe environ autour de 12 Vol-%. Il est donc recommandé d'adapter en conséquence les catégories de teneurs en vide dans la normalisation.

6. CONCLUSIONS

6.1 PRINCIPAUX CONSTATS

- + **Des vides accessibles sont nécessaires.** Les analyses effectuées dans le cadre de ce projet ont montré de manière consistante que tous les revêtements fournissant une « bonne » performance acoustique sont caractérisés par de faibles bruits dus à l'écoulement de l'air, et donc par des vides accessibles depuis la surface. Ce constat est important dans la mesure où les analyses ne portent pas sur l'état neuf mais sur l'état trois ans après la pose. On peut conclure que des revêtements semi-denses, soumis à de fortes charges de trafic, qui présentent des propriétés intactes 3 ans après la pose, ne vont pas changer subitement ; il peut donc être admis que les « bons » revêtements et les revêtements acoustiquement durables ont en commun des vides accessibles depuis la surface, lesquels assurent à la fois un faible bruit dû à l'écoulement de l'air et un certain niveau d'absorption du son.
- + **Les teneurs en filler et en sable sont les paramètres déterminants pour les enrobés semi-denses.** Pour les revêtements PA, l'efficacité acoustique des vides du mélange peut être directement liée à sa teneur en vide. Pour les enrobés semi-denses, le mode d'action acoustique est plus complexe et le seul contrôle de la teneur en vide n'est pas suffisant. La présente étude montre que l'accessibilité des vides depuis la surface dépend essentiellement des teneurs en filler et en sable de la recette. Lorsque les vides sont colmatés par des teneurs en filler et en sable, le revêtement peut toujours présenter des teneurs en vide élevées, qui ne sont toutefois pas efficaces d'un point de vue acoustique car les vides ne sont pas accessibles depuis la surface. De même, les sollicitations du trafic ne permettent pas de rendre les vides accessibles depuis la surface (pas d'auto-nettoyage). Afin de garantir la performance acoustique des enrobés semi-denses, il faut éviter de dépasser les teneurs en fillers et en sable proposées. Cet état de fait devrait être pris en compte dans la normalisation.
- + **La zone limite acoustique entre semi-dense et dense ne doit pas être dépassée.** Il faut s'assurer que cette zone limite acoustique ne soit pas franchie et que l'accessibilité et la communicabilité des vides ne soient pas réduites ou anéanties en raison du colmatage dû à des teneurs en fillers et en sable trop élevées. Les dispositions d'exécution acoustiques proposées pour la règle SNR 640 436:2015 constituent un progrès important pour minimiser la teneur en vide des enrobés semi-denses tout en garantissant la performance acoustique, et ainsi atteindre une durabilité aussi grande que possible des revêtements peu bruyants.

6.2 LIMITES DE L'ÉTUDE

- + Les critères limitatifs ayant conduit à exclure certains revêtements du champ de l'étude avaient trait à la disponibilité d'analyses de mélanges et de carottes localisables à petite échelle, ainsi qu'à l'existence d'une série de mesurages acoustiques effectués sur plusieurs années avec la méthode de la remorque CPX. Alors que pour les revêtements de diamètre 8, on a pu recourir à un échantillon relativement important, celui des revêtements de diamètre 4 (comportant 68 carottes et des valeurs acoustiques de trois ans après la pose) était inférieur de plus de la moitié. Il convient d'en tenir compte en conséquence dans l'évaluation des résultats. Les résultats obtenus pour les revêtements de diamètre 4 peuvent toutefois être considérés comme fiables, dans la mesure où ils sont cohérents par rapport aux conclusions tirées pour les revêtements de diamètre 8, et ont pu être vérifiés et validés à l'aide d'un ensemble exhaustif de données de contrôle indépendantes.

- + La grandeur déterminante sur laquelle se fondent les analyses est la performance acoustique trois ans après la pose. Cet ensemble de données constitue un bon compromis, car d'une part il repose sur un état le plus tardif possible, ce qui permet une prise en compte de la durabilité de la performance acoustique, et d'autre part il offre un échantillon suffisamment large pour l'analyse des données. À supposer que l'on dispose de données permettant de répéter les analyses pour des états plus tardifs (par ex. cinq ou dix ans après la pose), il pourrait en résulter d'autres paramètres décisifs (par ex. degré de compactage de la couche posée), qui ne jouaient pas encore de rôle dans l'obtention d'une « bonne » performance acoustique trois ans après la pose.
- + Concernant les analyses statistiques utilisées dans cette étude pour identifier les paramètres décisifs sur le plan de l'acoustique, il faut noter que le succès de la méthodologie dépend étroitement de la qualité et de l'exactitude des grandeurs analysées. Lorsque celles-ci sont trop d'incertaines ou n'expliquent pas suffisamment le phénomène à analyser, elles ne peuvent pas être identifiées comme déterminantes avec la méthodologie utilisée. On suppose en conséquence que, hormis les paramètres déterminants identifiés, d'autres facteurs peuvent jouer un rôle décisif dans le maintien de la performance acoustique. On peut ainsi s'attendre à ce que, par exemple, les propriétés et la qualité du liant utilisé, les propriétés des fillers propres/étrangers, ainsi que certaines pratiques de pose puissent avoir un impact positif ou négatif sur la performance acoustique à long terme. Il est pour l'instant difficile de saisir et de quantifier de telles grandeurs. Il convient en outre de noter que la fabrication et la pose des enrobés semi-denses est une tâche délicate et fort complexe dont la réussite ne dépend pas d'un seul paramètre déterminant. La problématique est hautement complexe et doit par conséquent toujours être considérée dans un espace à variables multiples. Des possibilités d'optimisation sont donc à rechercher dans tous les domaines.

6.3 BESOINS EN RECHERCHE SUPPLÉMENTAIRES

- + Afin de fournir d'autres paramètres qui pourraient avoir une influence déterminante sur la durabilité des performances acoustiques des enrobés semi-denses, les analyses effectuées dans le cadre de cette étude devraient être répétées ultérieurement avec des données améliorées.
- + Il s'agira également d'identifier d'autres paramètres décisifs n'ayant jusqu'à présent que rarement été décrits et documentés en détail, par ex. les processus et les pratiques lors la pose.
- + Il manque actuellement une méthode simple et directe pour déterminer en laboratoire la teneur en vide accessible. Celle-ci doit être calibrée avec des mesurages in-situ. Une telle méthode permettrait de mieux déterminer en laboratoire les propriétés acoustiques futures.

Grolimund + Partner AG

Nibuxs Sàrl

Erik Bühlmann



Jacques Perret



Emanuel Hammer



Nicolas Bueche



ANNEXES

1 VUE D'ENSEMBLE DES MÉTADONNÉES DES ANALYSES DE CAROTTES ET DE MÉLANGES

Le Tableau 1 montre tous les paramètres mécaniques utilisés pour les modèles statistiques.

Tableau 12: Métadonnées des analyses de carottes et de mélanges

Catégorie	Priorité	Légende:	
		Priorisation selon évaluation de la commission d'accompagnement	Catégorie
		*** pertinent	B : Analyse du revêtement
		** plutôt pertinent	E : Premier examen
		* moins pertinent	M : Mélange
M	*	Centrale de fabrication / Centrale d'enrobage	
M	*	Degré de remplissage	
E	***	Nature du liant	
M	*	Teneur en liant soluble	
M	*	Lieu de prélèvement	
M	*	Fluage	
E	*	Fillers	
E	*	Type/origine de la roche	
B	***	Teneur en vide résiduel (Marshall)	
M	***	HM volumétrique	
M	*	Température du mélange	
M	*	Module de Richesse	
B+M	***	Densité	
M	***	Densité apparente	
B	***	Épaisseur de la couche	
M	**	Courbe granulométrique	
M	*	Stabilité	
B	**	Degré de compactage	
E	*	Sensibilité à l'eau	

x: Le "Module de Richesse" est une valeur caractéristique de l'épaisseur du film de liant qui enrobe le granulat dans le mélange de l'enrobé (VSS 640 431). Le film de liant est déterminant pour une bonne liaison des agrégats afin d'éviter l'arrachement des grains. Le « Module de Richesse » M_R est défini comme suit :

$$M_R = \frac{B_{GK}}{A \cdot \sqrt[5]{\frac{0,25 \cdot (100-a) + 2,3(a-b) + 12 \cdot (\quad) \cdot b - c + 150 \cdot c}{100}}}$$

Éq. 1

où :

B_{GK} : Teneur en liant dosée en fonction de la masse du granulat

A: Coefficient d'adaptation à la densité apparente effective du granulat

a: Passant à 4.0 mm [Masse-%]

b: Passant à 0.25 mm [Masse-%]

c: Passant à 0.063 mm [Masse-%]

2 MÉTHODES DE MESURAGE IN-SITU

MESURAGES DE LA RÉSISTANCE À L'ÉCOULEMENT DE L'AIR SOUS CLOCHE

Un mesurage de la résistance à l'écoulement de l'air à la surface du revêtement permet de déterminer la « facilité » avec laquelle l'air peut s'échapper de la zone de contact pneu-chaussée, ce qui renseigne également sur la formation du son dans la zone de contact pneu-chaussée.

A cette fin, un courant d'air régulier est produit à l'aide d'un compresseur à l'intérieur d'un canal « sous cloche », puis mesuré dans un second canal. La surpression est mesurée dans la chambre en fonction du flux contrôlé de l'air entrant. En théorie, les deux grandeurs de mesure sont linéairement dépendantes, la pente étant dépendante de la vitesse à laquelle l'air peut s'échapper du revêtement. On obtient ainsi une indication de la quantité d'air qui s'échappe dans la zone de contact entre le pneu et le revêtement routier.

La résistance à l'écoulement de l'air d'une couche de roulement est définie comme quotient de la surpression dans la chambre Δp par rapport au flux q . La résistance à l'écoulement de l'air spécifique R_s est définie comme quotient de la surpression de la vitesse de l'écoulement q/A (A désigne la surface examinée).

On détermine la résistance à l'écoulement de l'air spécifique d'un revêtement routier de manière empirique à une vitesse d'écoulement de l'air qui est exactement de 0.0125 m/s.

PROCÉDURE DE MESURAGE CPX

La méthode CPX utilisée par G+P AG est conforme à ISO/DIS 11819-2:2012. Cette méthode détermine les propriétés acoustiques des revêtements routiers par un mesurage continu et direct des bruits du contact pneu-chaussée à l'aide d'une remorque de mesurage.

Le système de mesurage CPX consiste à mesurer le niveau sonore dans deux chambres insonorisées séparées situées à l'intérieur de la remorque, directement à proximité des pneus et contenant chacune deux microphones. La remorque utilisée par G+P remplit les critères fixés par ISO/DIS 11819-2:2012 en ce qui concerne l'influence des résultats de mesurage à travers les réflexions sonores produites par l'appareil ainsi qu'à travers les bruits sonores internes et externes (voir résultats du test à l'annexe 3).



Figure 19 : Remorque de mesurage

Les jeux de pneus de test utilisés sont représentés à la Figure 20 : Uniroyal Tigerpaw (SRTT) 225/60-R16 (pneus de test A1 pour voitures de tourisme /Cars) et Avon AV4 195-R14C (pneus de test D1 pour camions/Trucks).



Figure 20: Pneus testés par CPX A1 et D1

La Figure 21 donne une vue schématique du système de mesurage de G+P.

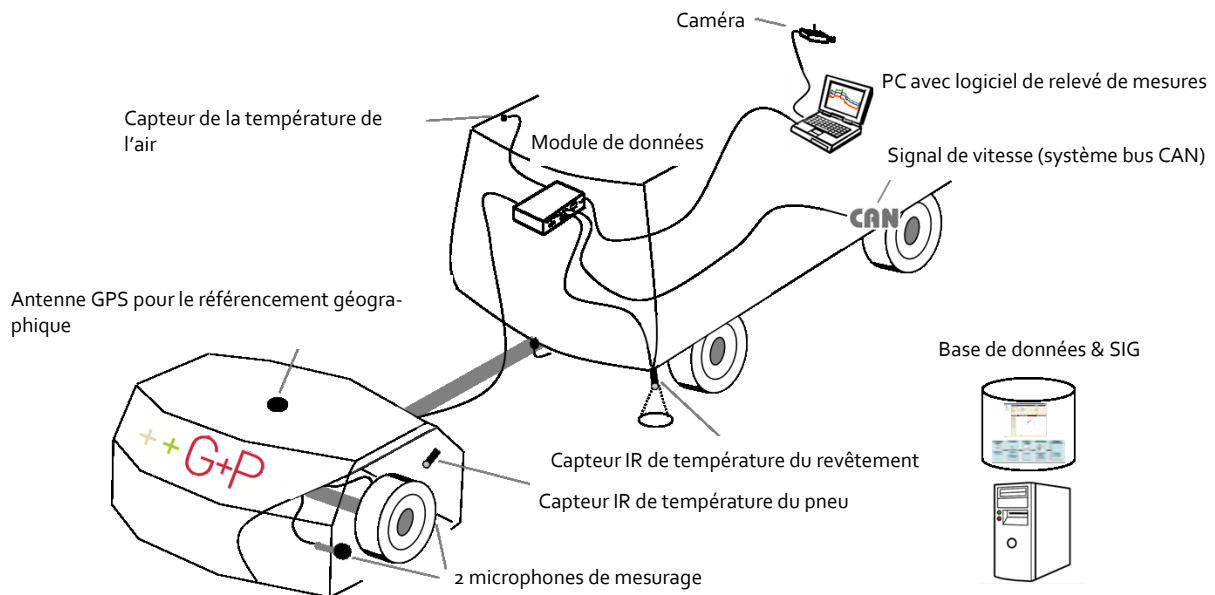


Figure 21: Vue d'ensemble schématique du système de mesurage G+P

Les signaux des 4 microphones de mesure (2 microphones de chaque côté), le signal de vitesse du système CAN-Bus du véhicule tractant, le signal GPS pour le géoréférencement des données de mesure, ainsi que les signaux des capteurs de température sont traités au niveau du module de données central et enregistrés dans le logiciel de mesure. L'annonce graphique directe des signaux de mesure permet la surveillance continue de l'ensemble de l'opération de mesure pendant le trajet. Une caméra fixée sur l'avant du véhicule filme en permanence la surface de la route à des fins d'interprétation et de contrôle. Toutes les données de mesure sont couplées à des indications de lieu et temps du module de données, et stockées dans une application de base de données spécialement développée à cet effet à des fins d'évaluation.

3 RELATION ENTRE LES MÉTHODES DE DÉTERMINATION DE LA TENEUR EN VIDE GÉOMÉTRIQUE ET HYDROSTATIQUE

La Figure 22 décrit la corrélation entre les deux méthodes (géométrique et hydrostatique) utilisées pour déterminer la teneur en vide sur carotte et en éprouvette Marshall. La corrélation comprend 72 données de carottes provenant de revêtements de diamètres 4 et 8 du canton d'Argovie et ayant été posé entre 2013 et 2016. On constate une dispersion relativement faible avec un R^2 de 0.9. La corrélation est très forte avec une pente de 1.0. Le segment de l'axe y de 3.0 indique que les teneurs en vide déterminées avec la méthode géométrique sont plus élevées de 3 % en moyenne que celles déterminées avec la méthode hydrostatique. L'erreur moyenne est de $\pm 0.6\%$.

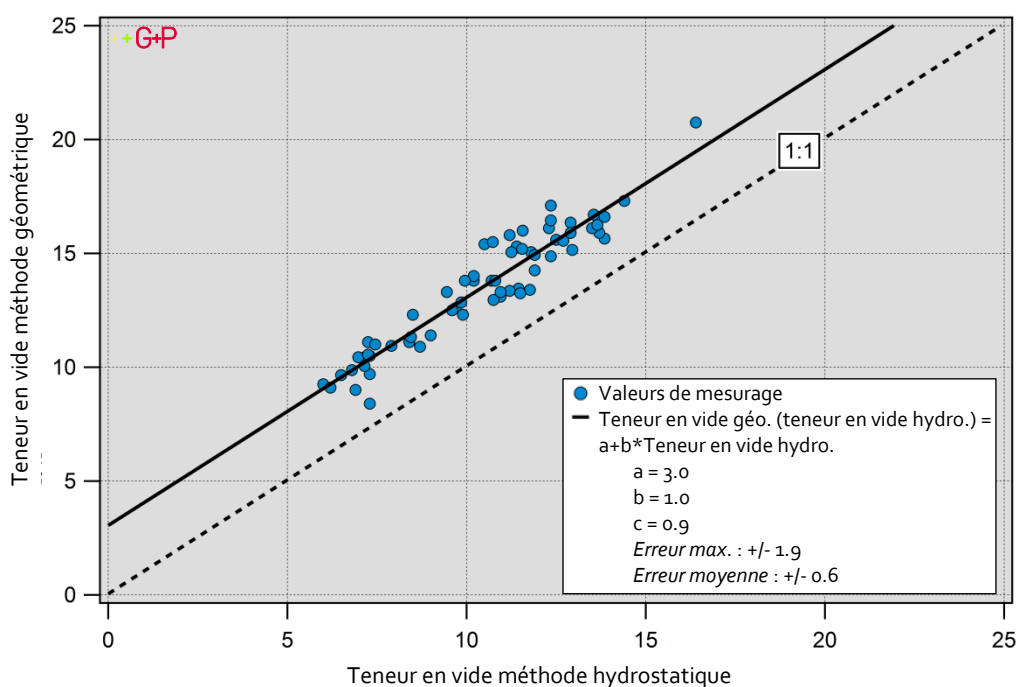


Figure 22 : Corrélation entre les deux procédés (géométrique et hydrostatique) utilisés pour déterminer la teneur en vide dans des carottes et en éprouvette Marshall. Les données proviennent de revêtements de diamètres 4 et 8 posés entre 2013 et 2016 dans le canton d'Argovie.

4 ANALYSE DÉTAILLÉE DES MODÈLES STATISTIQUES

Figure 25 et la Figure 28 présentent les résultats bruts fournis par le modèle de régression linéaire à variables multiples pour les revêtements de diamètres 4 et 8 en ce qui concerne la performance acoustique à l'état neuf, 1 an, 3 ans et 5 ans après la pose. La colinéarité et la plausibilité des variables issues de ces résultats ont également été vérifiées.

```
Call:
lm(formula = dd_dependent[, "STLN1TK_SOL_neuz_4mm"] ~ Sieb04_000_MW +
    Steigung_4mm + Bindemittelanteil_MW + Temperatur_50 + Sieb00_063_MW +
    Feuchte_50 + Verdichtungsgrad_4mm + Rohdichte_BK_4mm, data = dd_independent)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-2.40647 -0.41380  0.01261  0.39917  2.38936

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)   -13.736492   10.968448  -1.252  0.21473
Sieb04_000_MW    0.005727    0.070019   0.082  0.93505
Steigung_4mm   -0.170733    0.050189  -3.402  0.00112 **
Bindemittelanteil_MW  1.749182    0.385423   4.538 2.37e-05 ***
Temperatur_50    0.071041    0.034944   2.033  0.04596 *
Sieb00_063_MW  -0.159940    0.059834  -2.673  0.00940 **
Feuchte_50     -0.034596    0.016916  -2.045  0.04471 *
Verdichtungsgrad_4mm -0.122131    0.060593  -2.016  0.04780 *
Rohdichte_BK_4mm  0.004906    0.003443   1.425  0.15880

---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.8678 on 68 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.5199,    Adjusted R-squared:  0.4635
F-statistic: 9.206 on 8 and 68 DF,  p-value: 1.726e-08
```

Figure 23 : Résultats issus du modèle de régression linéaire à variables multiples pour les revêtements de diamètre 4 indiquant la performance acoustique à l'état neuf.

```
Call:
lm(formula = dd_dep_AlterA[, "STLN1TK_SOL_AgeA_4mm"] ~ Sieb00_063_MW +
  AnzUeberroll_N2 + AnzUeberroll_Ges + Steigung_4mm + Sieb02_000_MW +
  Bindemittelanteil_MW + Temperatur_50 + a_Fahrzeit, data = dd_indep_AlterA)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-3.4576 -0.5411 -0.0525  0.5678  5.9922

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)   -3.184e+01  8.260e+00  -3.855 0.000288 ***
Sieb00_063_MW    5.840e-01  1.536e-01   3.802 0.000343 ***
AnzUeberroll_N2    8.469e-06  3.554e-06   2.383 0.020430 *
AnzUeberroll_Ges  -1.597e-07  7.687e-08  -2.077 0.042129 *
Steigung_4mm    -1.900e-01  8.144e-02  -2.333 0.023064 *
Sieb02_000_MW    1.023e-01  3.927e-02   2.605 0.011620 *
Bindemittelanteil_MW 2.460e+00  1.126e+00   2.184 0.032916 *
Temperatur_50    1.634e-01  8.075e-02   2.023 0.047580 *
a_Fahrzeit      -7.009e-02  4.278e-02  -1.638 0.106672
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 1.342 on 59 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.4856,    Adjusted R-squared:  0.4158
F-statistic: 6.962 on 8 and 59 DF,  p-value: 2.018e-06
```

Figure 24 : Résultats issus du modèle de régression linéaire à variables multiples pour les revêtements de diamètre 4 indiquant la performance acoustique 1 an après la pose.

```
Call:
lm(formula = dd_dep_AlterB[, "STLN1TK_SOL_ageB_4mm"] ~ a_Fahrzeit +
  Schichtdicke_4mm + Raumdichte_MPK_MW + Hohlraumgehalt_BK_4mm +
  Sieb00_063_MW + verdichtungsgrad_4mm + wind_50, data = dd_indep_AlterB)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-3.2570 -1.1975 -0.0298  0.8470  4.0540

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)   23.43586  20.70161   1.132 0.265298
a_Fahrzeit    -0.21986   0.05851  -3.758 0.000625 ***
Schichtdicke_4mm -0.12177   0.06071  -2.006 0.052675 .
Raumdichte_MPK_MW -21.23642   5.76243  -3.685 0.000768 ***
Hohlraumgehalt_BK_4mm 0.70836   0.24387   2.905 0.006330 **
Sieb00_063_MW  -1.22949   0.54883  -2.240 0.031527 *
Verdichtungsgrad_4mm 0.24360   0.15493   1.572 0.124875
Wind_50        0.36195   0.23170   1.562 0.127249
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 1.839 on 35 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.4599,    Adjusted R-squared:  0.3519
F-statistic: 4.258 on 7 and 35 DF,  p-value: 0.001709
```

Figure 25 : Résultats issus du modèle de régression linéaire à variables multiples pour les revêtements de diamètre 4 indiquant la performance acoustique 3 ans après la pose.

```
Call:
lm(formula = dd_dependent[, "STLN1TK_SOL_neuz_8mm"] ~ Rohdichte_BK_8mm +
  Fließwert_MW + Wind_50 + AnzUeberroll_Ges + Hohlraumgehalt_BK_8mm +
  Temperatur_insitu_MW + a_Fahrzeit + AnzUeberroll_N2 + Steigung_8mm +
  Sieb00_500_MW + Sieb04_000_MW + Sieb02_000_MW + Hohlraumgehalt_MPK_MW,
  data = dd_independent)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-2.83544 -0.49832 -0.03674  0.51970  2.97210

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)   -5.464e+01  2.439e+01  -2.240  0.026613 *
Rohdichte_BK_8mm  1.953e-02  1.064e-02   1.837  0.068353 .
Fließwert_MW    1.841e+00  3.071e-01   5.996  1.59e-08 ***
Wind_50        2.944e-01  1.313e-01   2.242  0.026537 *
AnzUeberroll_Ges  8.986e-07  1.721e-07   5.221  6.19e-07 ***
Hohlraumgehalt_BK_8mm  2.389e-01  2.667e-01   0.896  0.371966
Temperatur_insitu_MW -2.237e-02  9.430e-03  -2.373  0.019004 *
a_Fahrzeit     -2.482e-02  9.067e-03  -2.737  0.006994 **
AnzUeberroll_N2  -7.289e-06  2.066e-06  -3.529  0.000563 ***
Steigung_8mm   -6.914e-02  2.950e-02  -2.343  0.020505 *
Sieb00_500_MW   9.851e-02  1.224e-01   0.805  0.422134
Sieb04_000_MW  -1.008e-01  2.758e-02  -3.656  0.000360 ***
Sieb02_000_MW   2.621e-01  9.541e-02   2.747  0.006790 **
Hohlraumgehalt_MPK_MW  1.637e-01  1.014e-01   1.615  0.108587
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.8407 on 142 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.5483,    Adjusted R-squared:  0.5069
F-statistic: 13.26 on 13 and 142 DF,  p-value: < 2.2e-16
```

Figure 26 : Résultats issus du modèle de régression linéaire à variables multiples pour les revêtements de diamètre 8 indiquant la performance acoustique à l'état neuf.

```

Call:
lm(formula = dd_dep_AlterA[, "STLN1TK_SOL_ageA_8mm"] ~ Sieb02_000_MW +
  a_Fahrzeit + Temperatur_50 + Steigung_8mm + Wind_50 + Sieb08_000_MW +
  Sieb00_063_MW + Schichtdicke_8mm, data = dd_indep_AlterA)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-2.34040 -0.38173  0.01968  0.37719  1.68598

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  -18.074982   2.785602  -6.489 3.26e-09 ***
Sieb02_000_MW  0.264731   0.034256   7.728 8.29e-12 ***
a_Fahrzeit    -0.034459   0.009694  -3.555 0.000578 ***
Temperatur_50  0.110908   0.023120   4.797 5.57e-06 ***
Steigung_8mm  -0.132700   0.032761  -4.050 0.000100 ***
Wind_50       0.304686   0.113002   2.696 0.008216 **
Sieb08_000_MW  0.093610   0.031167   3.003 0.003365 **
Sieb00_063_MW -0.318317   0.146187  -2.177 0.031774 *
Schichtdicke_8mm  0.013205   0.009322   1.417 0.159706
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.6893 on 101 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.6579,    Adjusted R-squared:  0.6308
F-statistic: 24.27 on 8 and 101 DF,  p-value: < 2.2e-16
  
```

Figure 27 : Résultats issus du modèle de régression linéaire à variables multiples pour les revêtements de diamètre 8 indiquant la performance acoustique 1 an après la pose.

```
Call:
lm(formula = dd_dep_AlterB[, "STLN1TK_SOL_ageB_8mm"] ~ sieb02_000_MW +
  a_Fahrzeit + Temperatur_50 + Temperatur_insitu_MW + wind_50 +
  Fließwert_MW + Hohlraumgehalt_MPK_MW + Ausfuellungsgrad_MW +
  Raumdichte_MPK_MW + Sieb00_063_MW, data = dd_indep_AlterB)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-1.68415 -0.46937 -0.05401  0.48207  1.57013

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  -2.791e+02  5.695e+01  -4.901 7.18e-06 ***
Sieb02_000_MW  1.004e+00  1.292e-01   7.769 9.96e-11 ***
a_Fahrzeit    -3.863e-02  1.200e-02  -3.220 0.002040 **
Temperatur_50  1.148e-01  3.629e-02   3.163 0.002418 **
Temperatur_insitu_MW -2.592e-04  1.360e-02  -0.019 0.984860
wind_50       8.129e-01  2.167e-01   3.752 0.000389 ***
Fließwert_MW  -2.221e+00  5.672e-01  -3.916 0.000227 ***
Hohlraumgehalt_MPK_MW 5.910e+00  1.165e+00   5.072 3.82e-06 ***
Ausfuellungsgrad_MW  1.120e+00  2.417e-01   4.634 1.89e-05 ***
Raumdichte_MPK_MW  6.534e+01  1.618e+01   4.039 0.000150 ***
Sieb00_063_MW  -6.726e-01  2.338e-01  -2.877 0.005501 **
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.7118 on 62 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.8043,    Adjusted R-squared:  0.7727
F-statistic: 25.48 on 10 and 62 DF,  p-value: < 2.2e-16
```

Figure 28 : Résultats issus du modèle de régression linéaire à variables multiples pour les revêtements de diamètre 8 indiquant la performance acoustique 3 ans après la pose.

Les Figure 29 et 30 indiquent les performances acoustiques modélisées et mesurées pour des revêtements de diamètres 4 et 8, 3 ans après la pose. Le coefficient de détermination (multiple R-squared) relativement élevé de 0.8 pour les revêtements de diamètre 8 est également bien visible sur la Figure 30 en raison de la dispersion relativement faible.

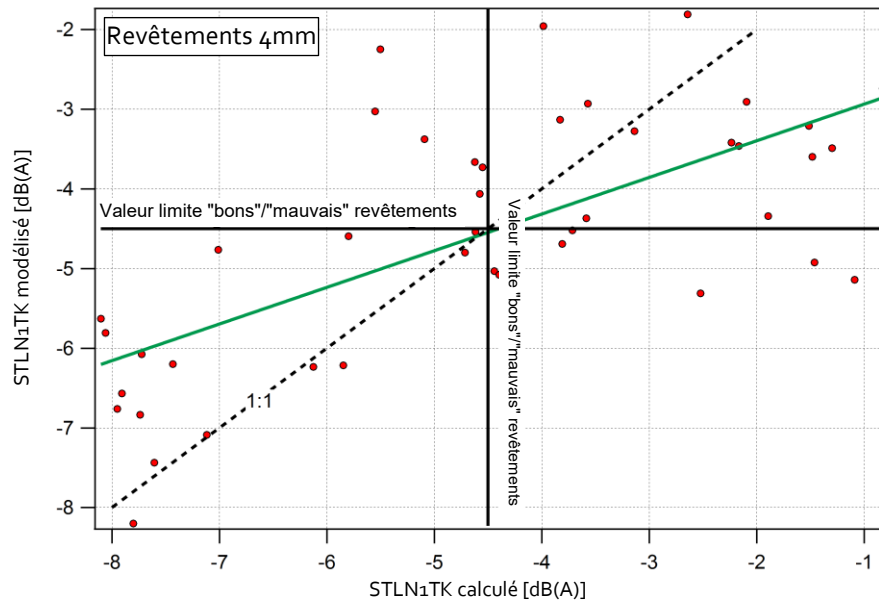


Figure 29 : Valeurs de la qualité acoustique du revêtement mesurées versus modélisées pour les voitures de tourisme (STLN₁TK) pour les revêtements de diamètre 4.

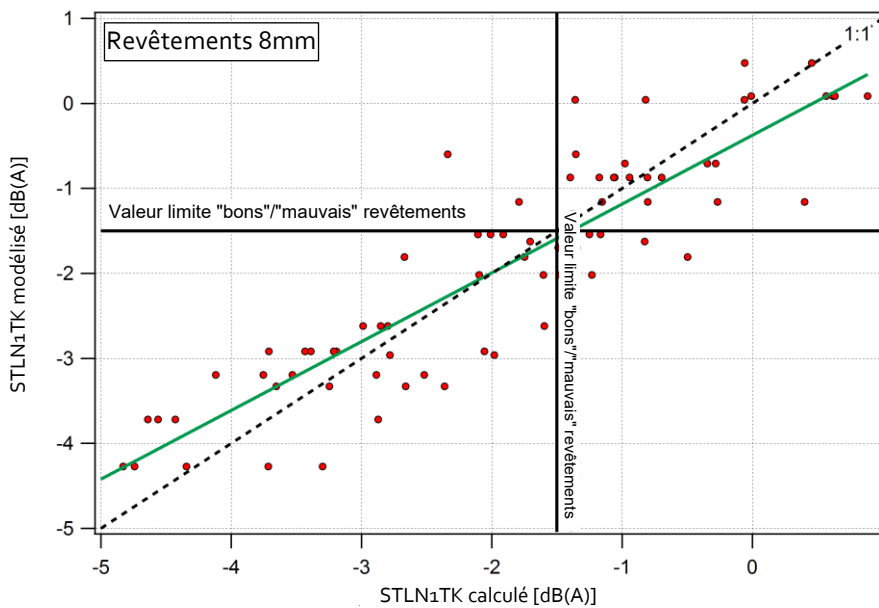


Figure 30 : Valeurs de la qualité acoustique du revêtement mesurées versus modélisées pour les voitures de tourisme (STLN₁TK) pour les revêtements de diamètre 8.

5 ANALYSE DÉTAILLÉE DES VALEURS OPTIMALES

Les figures ci-dessous décrivent les paramètres passant au tamis 0.063 mm (teneur en filler), passant au tamis 2.0 mm (teneur en sable) et degré de compactage avec la proportion relative pour ces paramètres de revêtements de diamètres 4 et 8 présentant de bonnes valeurs de la qualité acoustique du revêtement. On a procédé à cette analyse afin d'identifier les valeurs optimales pour les paramètres.

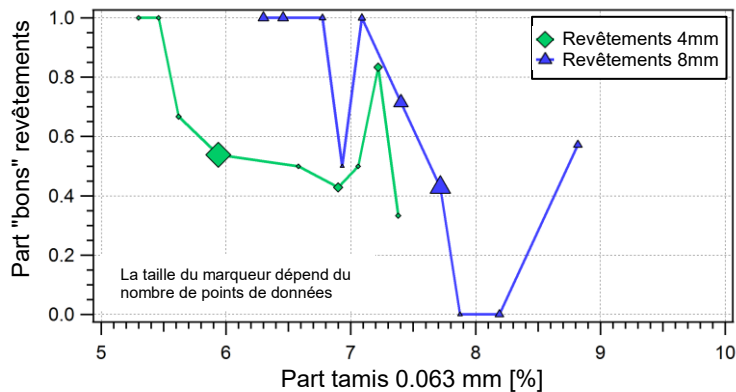


Figure 31 : Proportion de revêtements de diamètres 4 et 8 présentant de bonnes valeurs de la qualité acoustique du revêtement pour un passant au tamis 0.063 mm (teneur en filler).

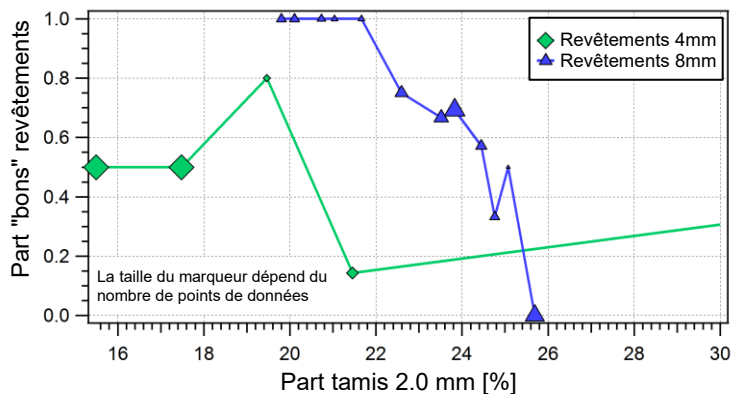


Figure 32 : Proportion de revêtements de diamètres 4 et 8 présentant de bonnes valeurs de la qualité acoustique du revêtement pour un passant au tamis 0.2 mm (teneur en sable).

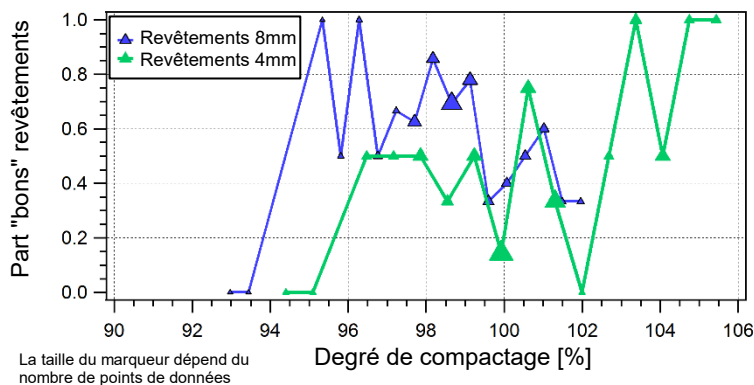


Figure 33 : Proportion de revêtements de diamètres 4 et 8 présentant de bonnes valeurs de la qualité acoustique du revêtement selon le degré de compactage.

6 ANALYSE DES VALEURS OPTIMALES ÉLARGIES

Les analyses des valeurs optimales ont été décrites et présentées au chapitre 4.3. Afin de déterminer la différence entre les revêtements présentant des valeurs de qualité acoustique du revêtement basses et élevées pour une certaine valeur (par exemple en ce qui concerne la teneur en filler), on a également effectué un test t (voir chapitre 3.3). Pour chaque plage de valeurs comprenant des valeurs de qualité acoustique du revêtement basses et élevées (c.à.d. carrés verts et rouges), un test t a donc été effectué pour tous les paramètres présents dans ces deux groupes afin d'identifier les plus pertinents d'entre eux.

La Figure 34 présente le résultat du test t pour les deux groupes des revêtements de diamètre 4 « bons » et « mauvais » de la Figure 7 de la plage de valeurs pour la teneur de fillers (tamis 0.063 mm) de 6.5 à 7.0%. Les seules variables significatives qui décrivent la différence entre les deux groupes en ce qui concerne la valeur de la qualité acoustique du revêtement sont : le bruit pneu-chaussée CPX à la fréquence de 1'000 Hz (CPXcar1000TK_SOL_ageB_4mm), la teneur en vide sur carotte (Hohlraumgehalt_BK_4mm) et la densité apparente (Rohdichte_BK_4mm). Il n'y a rien d'étonnant à ce que le paramètre bruit pneu-chaussée CPX soit défini comme significatif pour la fréquence de 1'000 Hz, et ceci a été discuté dans les chapitres 4.3 et 4.4. Après vérification de la colinéarité, le paramètre qui subsiste est celui de la teneur en vide sur carotte (Hohlraumgehalt_BK_4mm). La Figure 35 représente les distributions des deux groupes pour ce paramètre reconnu comme significatif. On constate que le groupe des « bons » revêtements de diamètre 4 présente des valeurs de teneur en vide plutôt plus basses (inférieures à 18 %) que celles des « mauvais » revêtements de diamètre 4, dont la teneur en vide se situe plutôt au-dessus de 20 %.

Point	testedWave	tTestH0Acc	tTest_P	tTest_t_stat
0	CPXcar500TK SOL AgeB 4mm	1	0.0514218	-2.15223
1	CPXcar1000TK SOL AgeB 4mm	0	0.00140973	-3.90647
2	CPXcar2000TK SOL AgeB 4mm	1	0.161013	-1.48029
3	K12	1		-inf
4	Hohlraumgehalt BK 4mm	0	0.00255541	-3.619
5	Rohdichte BK 4mm	0	0.00321182	3.50351
6	Schichtdicke 4mm	1	0.955818	0.0563692
7	Verdichtungsgrad 4mm	1	0.0781128	1.89911
8	Feuchte 50	1	0.597409	-0.540411
9	Temperatur 50	1	0.33042	-1.01246
10	Wind 50	1	0.871444	-0.164788
11	Bindemittelanteil MW	1	0.076363	-1.90394
12	Raumdicke MPK MW	1	0.0628645	2.019
13	Sieb00 063 MW	1	0.700611	0.392622
14	Sieb02 000 MW	1	0.572042	0.581164
15	Sieb04 000 MW	1	0.0613333	2.11185
16	Sieb08 000 MW	1		
17		0	0	0
18	a Fahrzeit	1	0.296606	-1.08148
19	Steigung 4mm	1	0.652799	0.45921
20		0	0	0
21	AnzUeberroll Ges	1	0.701239	-0.39121
22	AnzUeberroll N2	1	0.555078	0.607454

Figure 34 : Résultats du test pour la teneur en sable (teneur au tamis 0.063 mm) dans la zone située entre 6.5 et 7 % pour les deux groupes des « bons » et des « mauvais » revêtements de diamètre 4 de la Figure 7.

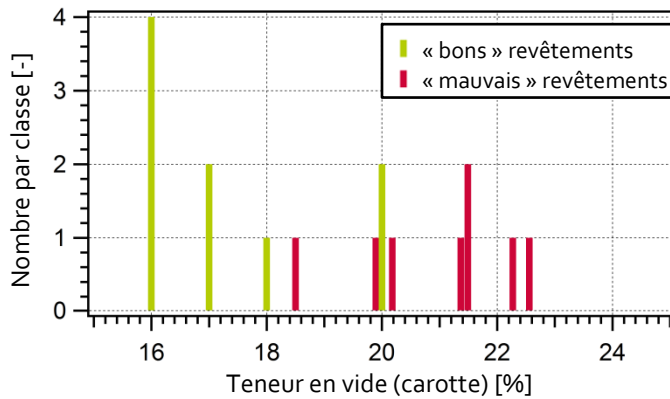


Figure 35 : Distributions de la teneur en vide sur carotte (teneur en vide sur carotte; mesurée avec méthode volumétrique) avec une teneur en filler (passant au tamis d'analyses 0.063 mm) dans la zone comprise entre 6.5 et 7.0 % pour les deux groupes de revêtements de diamètre 4 « bons » (en vert) et « mauvais » (en rouge).

La Figure 36 présente le résultat du test t pour les deux groupes de revêtements de diamètre 4 « bons » et « mauvais » de la Figure 7 de la plage de valeurs pour la teneur en filler (tamis 0.063 mm) située entre 5 et 6 %. Il en résulte principalement le nombre de passages de véhicules lourds (N₂ ; AnzUeberroll_N₂), qui décrit de manière significative la différence entre les deux groupes en ce qui concerne la valeur de la qualité acoustique du revêtement. Cela signifie qu'un nombre plus important de passages de véhicules lourds augmente le risque pour les « mauvais » revêtements de diamètre 4 avec une teneur en fines de 5 à 6 %.

Point	testedWave	tTestH0Acc	tTest_P	tTest_t_stat
0	CPXcar500TK SOL AqeB 4mm	1	0.777615	-0.286909
1	CPXcar1000TK SOL AqeB 4mm	0	4.7421e-09	-11.3663
2	CPXcar2000TK SOL AqeB 4mm	0	9.19796e-06	-6.17545
3	KI2	1		-inf
4	Hohlraumgehalt BK 4mm	1	0.873575	-0.161702
5	Rohdichte BK 4mm	1	0.389811	0.881226
6	Schichtdicke 4mm	1	0.0538767	2.10719
7	Verdichtungsrad 4mm	1	0.526381	0.646103
8	Feuchte 50	1	0.785361	-0.276441
9	Temperatur 50	1	0.0570583	2.03313
10	Wind 50	1	0.97607	0.0304161
11	Bindemittelanteil MW	1	0.135352	-1.58741
12	Raumdicke MPK MW	1	0.495186	0.698819
13	Sieb00 063 MW	1	0.167851	-1.5
14	Sieb02 000 MW	1	0.288686	-1.09665
15	Sieb04 000 MW	1	0.0674867	-1.95272
16	Sieb08 000 MW	1		
17		0	0	0
18	a Fahrzeit	0	0.00042325	4.42841
19	Steigung 4mm	1	0.799081	0.258736
20		0	0	0
21	AnzUeberroll Ges	1	0.0782994	-1.8803
22	AnzUeberroll N2	0	0.00699856	-3.2725

Figure 36: Résultat du test t avec une teneur en sable (teneur au tamis 0.063 mm) dans la zone située entre 5 et 6 % pour les deux groupes de revêtements de diamètre 4 « bons » et « mauvais » de la Figure 7.

Figure 37 présente le résultat du test t pour les deux groupes de revêtements de diamètre 4 « bons » et « mauvais » de la figure 8 de la plage de valeurs pour la teneur en sable (tamis 2.0 mm) située entre 11 et 13 %. Les seules variables significatives qui décrivent la différence de valeur de la qualité acoustique du revêtement entre les deux groupes sont : la teneur en vide sur carotte (Hohlraumgehalt_BK_4mm) et la densité apparente sur carotte (Rohdichte_BK_4mm). Après examen de la colinéarité, le paramètre qui subsiste est la teneur en vide sur carotte (Hohlraumgehalt_BK_4mm).

La Figure 38 représente les distributions des deux groupes pour ce paramètre reconnu comme significatif. On constate que le groupe des « bons » revêtements de diamètre 4 présente des valeurs de teneur en vide plutôt plus basses (inférieures à 18 %) que celles des « mauvais » revêtements de diamètre 4, qui sont plutôt plus élevées.

Point	testedWave	tTestH0Acc	tTest_P	tTest_t_stat
0	CPXcar500TK SOL AgeB 4mm	1	0.105902	-1.86317
1	CPXcar1000TK SOL AgeB 4mm	1	0.11737	-1.71337
2	CPXcar2000TK SOL AgeB 4mm	1	0.513302	-0.68234
3	KI2	1		-inf
4	Hohlraumgehalt BK 4mm	0	0.0462893	-2.31607
5	Rohdichte BK 4mm	0	0.0467399	2.31416
6	Schichtdicke 4mm	1	0.283974	1.13525
7	Verdichtungsgrad 4mm	1	0.155818	1.56887
8	Feuchte 50	1	0.810202	-0.247616
9	Temperatur 50	1	0.600834	-0.545654
10	Wind 50	1	0.430993	-0.81974
11	Bindemittelanteil MW	1	0.0907769	-1.96745
12	Raumdicke MPK MW	1	0.124385	1.7703
13	Sieb00 063 MW	1	0.15935	-1.62535
14	Sieb02 000 MW	1	0.0674967	-2.04869
15	Sieb04 000 MW	1	0.784592	0.279266
16	Sieb08 000 MW	1		
17		0	0	0
18	a Fahrzeit	1	0.117305	-1.68151
19	Steigung 4mm	1	0.949653	0.0645733
20		0	0	0
21	AnzUeberroll Ges	1	0.53254	-0.658738
22	AnzUeberroll N2	1	0.490214	0.71018

Figure 37 : Résultat du test t pour une teneur en sable (teneur au tamis 2.0 mm) dans la zone située entre 11 et 13 % pour les deux groupes de revêtements de diamètre 4 « bons » et « mauvais » de la Figure 8.

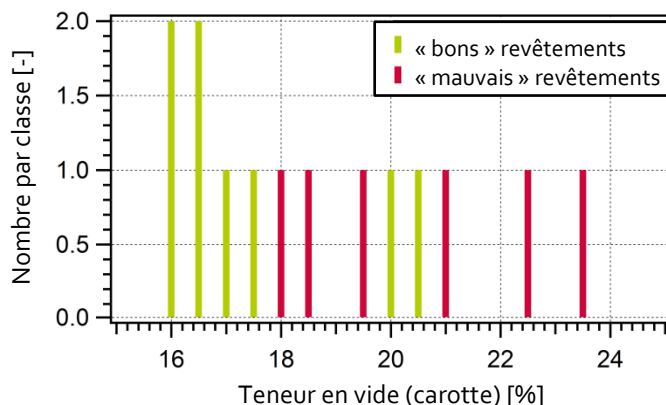


Figure 38 : Distributions de la teneur en vide sur carotte (teneur en vide sur carotte ; avec méthode volumétrique) avec teneur en sable (passant au tamis d'analyses 2.0 mm) dans la zone située entre 11 et 13 % pour les deux groupes de revêtements de diamètre 4 « bons » (en vert) et « mauvais » (en rouge).

La Figure 39 présente le résultat du test t pour les deux groupes de revêtements de diamètre 4 « bons » et « mauvais » de la Figure 8 de la plage de valeurs pour la teneur en sable (tamis 2.0 mm) située entre 46 et 50 %. Il en résulte principalement le nombre de passages de véhicules lourds (N₂ ; AnzUeberroll_N₂), qui décrit de manière significative la différence de valeur de la qualité acoustique du revêtement entre les deux groupes. Cela signifie qu'un nombre plus important de passages de véhicules lourds augmente le risque pour les « mauvais » revêtements de diamètre 4 avec une teneur en sable de 46 à 50 %.

Point	testedWave	tTestH0Acc	tTest_P	tTest_t_stat
0	CPXcar500TK SOL AqeB 4mm	1	0.517454	-0.657859
1	CPXcar1000TK SOL AqeB 4mm	0	4.0157e-10	-11.033
2	CPXcar2000TK SOL AqeB 4mm	0	1.05731e-06	-6.68275
3	KI2	1		-inf
4	Hohlraumgehalt BK 4mm	1	0.762747	0.306169
5	Rohdichte BK 4mm	1	0.797371	0.259913
6	Schichtdicke 4mm	1	0.0614621	1.97878
7	Verdichtungsgrad 4mm	1	0.790583	0.268933
8	Feuchte 50	1	0.64694	-0.464895
9	Temperatur 50	1	0.106611	1.69103
10	Wind 50	1	0.463906	0.745444
11	Bindemittelanteil MW	1	0.137428	-1.54918
12	Raumdichte MPK MW	1	0.127897	1.59852
13	Sieb00 063 MW	1	0.16397	-1.44822
14	Sieb02 000 MW	1	0.295694	-1.07137
15	Sieb04 000 MW	1	0.0824205	-1.82254
16	Sieb08 000 MW	1		
17		0	0	0
18	a Fahrzeit	0	0.0341429	2.26027
19	Steigung 4mm	1	0.430712	0.803281
20		0	0	0
21	AnzUeberroll Ges	1	0.0607508	-2.01151
22	AnzUeberroll N2	0	0.039343	-2.24399

Figure 39 : Résultat du test t pour une teneur en sable (teneur au tamis 2.0 mm) dans la zone située entre 46 et 50 % pour les deux groupes de revêtements de diamètre 4 « bons » et « mauvais » de la Figure 8.

La Figure 40 présente le résultat du test t pour les deux groupes de revêtements de diamètre 8 « bons » et « mauvais » à la Figure 9 de la plage de valeurs pour la teneur en filler (tamis 0.063 mm) située entre 7 et 7.5 %. Il résulte de ce test t plusieurs variables significatives qui décrivent la différence de valeur de la qualité acoustique du revêtement entre les deux groupes. Après examen de la colinéarité et de la plausibilité, il subsiste les paramètres teneur en vide sur carotte (Hohlraumgehalt_BK_8mm) et épaisseur de la couche (Schichtdicke_8mm). Pour le paramètre reconnu comme significatif de l'épaisseur de la couche, les distributions des deux groupes sont représentées à la Figure 41. On constate que le groupe des « bons » revêtements de diamètre 8 présente des épaisseurs de la couche plutôt basses, autour de 30 mm, et celles du groupe des « mauvais » revêtements de diamètre 8 plutôt autour de 40 mm.

La Figure 42 présente le paramètre de la teneur en vide sur carotte (Hohlraumgehalt_BK_8mm) qui s'est avéré significatif pour les deux groupes de revêtements « bons » et « mauvais » avec une teneur en filler (tamis 0.063 mm) de 7 à 7.5 %. On constate qu'une teneur en vide minimale sur carotte de 8% (mesurée par méthode hydrostatique) doit être présente pour pouvoir garantir un revêtement de diamètre 8 efficace d'un point de vue acoustique contenant une teneur en filler située à ce niveau encore 3 ans après la pose.

Point	testedWave	tTestH0Acc	tTest_P	tTest_t_stat
0	CPXcar500TK SOL aqeB 8mm	1	0.385625	0.876139
1	CPXcar1000TK SOL aqeB 8mm	0	2.60768e-10	-8.87327
2	CPXcar2000TK SOL aqeB 8mm	0	4.03394e-09	-8.28141
3	KI2	1		-inf
4	Hohlraumgehalt BK 8mm	0	0.000267355	3.94219
5	Rohdichte BK 8mm	0	0.000559466	-3.71362
6	Schichtdicke 8mm	0	0.000100303	-4.25211
7	Verdichtungsgrad 8mm	1	0.062128	-1.91352
8	Feuchte 50	1	0.454119	0.755664
9	Temperatur 50	1	0.415592	-0.821355
10	Wind 50	1	0.69574	0.395196
11	Ausfuellungsgrad MW	0	0.00197036	-3.28826
12	Bindemittelanteil MW	1	0.234264	-1.20833
13	Fließwert MW	0	1.24899e-07	6.27934
14	Hohlraumgehalt MPK MW	0	0.0029211	3.14634
15	Raumdicke MPK MW	0	0.00822735	-2.80044
16	Rohdichte Mischgut MW	1	0.661668	0.442053
17	Sieb00 063 MW	0	0.00130051	-3.42647
18	Sieb00 500 MW	0	0.00447796	-3.0726
19	Sieb02 000 MW	0	0.000596728	-3.69566
20	Sieb04 000 MW	1	0.0844381	-1.76281
21	Sieb08 000 MW	1	0.14614	-1.49891
22		0	0	0
23		0	0	0
24	Temperatur insitu MW	0	0.0012803	3.50831
25	a Fahrzeit	0	0.000252779	4.33155
26	Steigung 8mm	1	0.870016	-0.164595
27		0	0	0
28		0	0	0
29	AnzUeberroll Ges	1	0.594623	0.536938
30	AnzUeberroll N2	1	0.496633	0.685974

Figure 40 : Résultat du test t pour une teneur en sable (teneur au tamis 063 mm) située entre 7 et 7.5 % pour les deux groupes de revêtements de diamètre 8 « bons » et « mauvais » de la Figure 9.

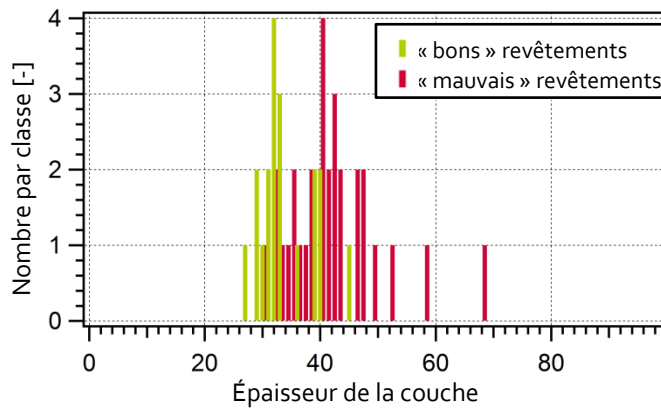


Figure 41 : Distributions de l'épaisseur de la couche avec teneur en filler (passant au tamis d'analyses 0.063 mm) dans la zone située entre 7 et 7.5 % pour les deux groupes de revêtements de diamètre 8 « bons » (en vert) et « mauvais » (en rouge).

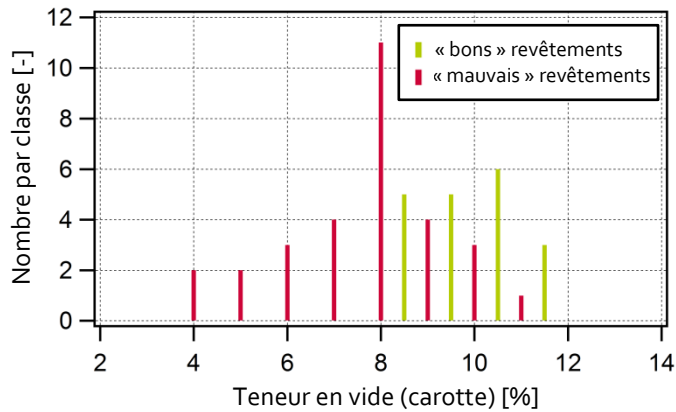


Figure 42 : Distributions de la teneur en vide sur carotte (teneur en vide sur carotte; avec méthode hydrostatique) avec teneur en filler (passant au tamis d'analyses 0.063 mm) dans la zone située entre 7 et 7.5 % pour les deux groupes de revêtements de diamètre 8 « bons » (en vert) et « mauvais » (en rouge).

La Figure 43 présente le résultat du test t pour les deux groupes de revêtements de diamètre 8 « bons » et « mauvais » de la Figure 10 de la plage de valeurs pour la teneur en sable (tamis 2.0 mm) de 11 à 13.5 %. Les seules variables significatives décrivant la différence de valeur de la qualité acoustique du revêtement entre les deux groupes sont : le bruit pneu-chaussée CPX à une fréquence de 1'000 Hz (CPXcar1000TK_SOL_ageB_8mm) et à une fréquence de 2'000 Hz (CPXcar2000TK_SOL_ageB_8mm), l'épaisseur de la couche (Schichtdicke_8mm) et la durée du transport du mélange depuis la centrale d'enrobage jusqu'au chantier (a_Fahrzeit). Il n'est pas étonnant que les deux paramètres bruit pneu-chaussée CPX à une fréquence de 1'000 Hz et à une fréquence de 2'000 Hz soient définis comme significatifs, et ceci est discuté aux chapitres 4.3 et 4.4. Pour le paramètre de l'épaisseur de la couche, défini comme significatif, les distributions des deux groupes sont représentées à la Figure 44. On constate que le groupe des « bons » revêtements de diamètre 8 présente des épaisseurs de la couche plutôt basses, autour de 30 mm, et celles du groupe des « mauvais » revêtements de diamètre 8 plutôt autour de 40 mm.

Point	testedWave	tTestH0Acc	tTest_P	tTest_t_stat
0	CPXcar500TK SOL ageB 8mm	1	0.0516907	2.01097
1	CPXcar1000TK SOL ageB 8mm	0	4.92163e-09	-7.52543
2	CPXcar2000TK SOL ageB 8mm	0	7.2655e-07	-5.87693
3	KI2	1		-inf
4	Hohlraumgehalt BK 8mm	1	0.111642	1.63872
5	Rohdichte BK 8mm	1	0.0722305	-1.86399
6	Schichtdicke 8mm	0	0.0246704	-2.34758
7	Verdichtungsgrad 8mm	1	0.0941414	-1.724
8	Feuchte 50	1	0.123566	1.57534
9	Temperatur 50	1	0.35751	-0.934343
10	Wind 50	1	0.142666	-1.49702
11	Ausfuellungsgrad MW	1	0.788842	0.269631
12	Bindemittelanteil MW	1	0.966269	-0.0425541
13	Fließwert MW	1	0.0876325	1.75103
14	Hohlraumgehalt MPK MW	1	0.724699	-0.354746
15	Raumdicke MPK MW	1	0.963119	0.0465407
16	Rohdichte Mischgut MW	1	0.588306	-0.545706
17	Sieb00 063 MW	1	0.291231	1.07033
18	Sieb00 500 MW	1	0.420848	0.813335
19	Sieb02 000 MW	1	0.318761	1.01595
20	Sieb04 000 MW	1	0.521414	0.646868
21	Sieb08 000 MW	1	0.377558	-0.892466
22		0	0	0
23		0	0	0
24	Temperatur insitu MW	1	0.654692	0.450944
25	a Fahrzeit	0	7.06835e-05	4.5742
26	Steigung 8mm	1	0.44247	-0.777095
27		0	0	0
28		0	0	0
29	AnzUeberroll Ges	1	0.918212	-0.103337
30	AnzUeberroll N2	1	0.916728	-0.105252

Figure 43 : Résultat du test t pour une teneur en sable (teneur au tamis 2.0 mm) dans la zone située entre 11 et 13,5 % pour les deux groupes de revêtements de diamètre 8 « bons » et « mauvais » de la Figure 10.

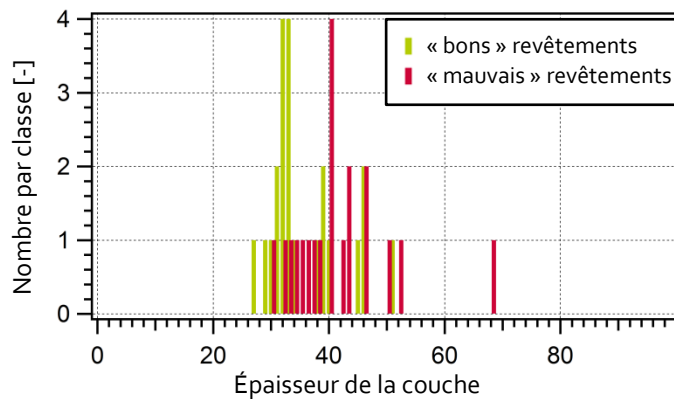


Figure 44: Distributions de l'épaisseur de la couche avec une teneur en sable (passant au tamis d'analyses 2.0 mm) dans la zone située entre 11 et 13,5 % pour les deux groupes de revêtements de diamètre 8 « bons » (en vert) et « mauvais » (en rouge).

7. BIBLIOGRAPHIE

- ASTM F762 / F762M-08. (2014). Standard Test Method for Determining Change in Groove (or Void) Depth With Distance Traveled for Passenger Car Tires. *ASTM International, West Conshohocken, PA*. Retrieved from www.astm.org
- Bühlmann, E., Bürgisser, P., Ziegler, T., Angst, C., & Beckenbauer Thomas. (2017). *Forschungspaket lärmarme Beläge innerorts Teilprojekt (TP 3): Lanzeitmonitoring. mobilityplattform*.
- Bühlmann, E., & Ziegler, T. (2012). Interpreting measured acoustic performance on Swiss low-noise road surfaces using a tyre / road interaction model, 1–6.
- Dumont, A., & Junod, A. (2004). Formulation et optimisation des formules d'enrobés. EPFL-LAVOC.
- Hintsteiner, E. (1996). *Asphalt-Handbuch*. GESTRATA. Retrieved from <https://books.google.ch/books?id=Xkd3SwAACAAJ>
- Stahel, W. (2002). *Statistische Datenanalyse*. Vieweg+Teubner Verlag. <http://doi.org/10.1007/978-3-322-96962-0>
- VSS 640436:2015 - Semidichtes Mischgut und Deckschichten. (2015).