



Développement de matériaux à base de granulats de pneus usagés pour des applications acoustiques



Michel DORGET
Responsable du Département Matériaux
Centre de Transfert de Technologie du Mans
20 rue Thalès de Milet
72000 Le Mans
Tél. : 02 43 39 46 22
mdorget@cttm-lemans.com

Résumé

La législation concernant la protection de l'environnement est en perpétuelle évolution. En particulier il est maintenant obligatoire de se soucier : des nuisances sonores ainsi que du recyclage des pneumatiques usagés non réutilisables. C'est pourquoi le CTTM a proposé de développer de nouveaux matériaux à base de granulats de PUNR pour applications acoustiques, en particulier afin de réaliser des murs anti bruit.

La première partie de l'étude a consisté à faire un état de l'art : publications scientifiques, brevets, étude de marché, normes et réglementations.

Dans un second temps nous avons travaillé sur le procédé de réagglomération en lien avec les propriétés acoustiques intrinsèques du matériau. Pour ce faire nous sommes appuyés sur un modèle théorique acoustique concernant les matériaux poreux et sur un outil de simulation numérique. Un plan d'expérience sur les paramètres du procédé de réagglomération nous a permis de trouver le point de fonctionnement optimal.

La troisième étape a consisté en une optimisation de la géométrie des éléments absorbants. Différentes géométries ont été évaluées de sorte à accroître encore la performance acoustique. Cet optimum, comme le précédent, dépend du spectre routier que nous cherchons à absorber.

La quatrième étape concerne l'industrialisation et pour ce faire la société CAPREMIB nous a rejoint. La mise en place d'une ligne de production spécifique à ce type de technologie est à l'étude. D'autres paramètres comme la tenue au feu sont pris en compte.

In fine, nous pourrions dire si cette innovation brevetée est économiquement viable.

Mots clés : Granulats, liants, réagglomération, mesures acoustiques, mur antibruit.

Développement de matériaux à base de granulats de pneus usagés pour des applications acoustiques

Nicolas POULAIN et Michel DORGET
CTTM - Centre de Transfert de Technologie du Mans
20 rue Thalès de Millet - 72000 Le Mans
mdorget@cttm-lemans.com - Tél. : 02 43 39 46 22

Jean Paul PAYET, Société CAPREMIB

1 INTRODUCTION

L'objectif du projet est de concevoir et réaliser des barrières acoustiques à base de granulats de pneumatiques usagés non réutilisables (PUNR). Cette nouvelle technologie contribuera à la résolution simultanée de deux problèmes environnementaux d'actualité : la valorisation des pneumatiques et la réduction des nuisances liées au bruit (loi « Bruit » du 31.12.1992).

La première partie de l'étude, concerne le cadrage du projet. L'étude bibliographique, puis les premiers essais d'agglomération des granulés de caoutchouc, ont permis la définition de la méthode d'optimisation du matériau. La cible en terme de produit a été définie d'après une étude technico-économique du marché des écrans routiers.

Cette communication correspond aux phases 2 et 3 du projet portant sur la conception et la réalisation de barrières anti-bruit à base de granulats de PUNR, destinées aux infrastructures routières. La phase 2 concerne le développement matière et la sélection des paramètres de fabrication du matériau de façon à obtenir la meilleure absorption acoustique possible. La phase 3 concerne la géométrie à donner à la surface du matériau. Cette géométrie joue un rôle prépondérant dans la performance globale de la barrière. Des solutions au problème de la tenue au feu sont également recherchées.

En préparation à la phase 4, un partenariat a été établi avec un industriel pour, dans un premier temps, une validation de la fabrication de manière industrielle avec la réalisation de prototypes à l'échelle 1 qui seront testés en chambre semi-anéchoïque et éventuellement sur site, et ultérieurement une extension du partenariat à établir pour une prescription et commercialisation des produits.

Le CTTM, porteur du projet, est une structure de Transfert de Technologie basée sur Le Mans, de 37 personnes au budget annuel de 3 M€. Elle vise à :

- aider les sociétés à résoudre leurs problèmes techniques
- et a innover en matière de nouveaux produits et procédés.

Ces compétences couvrent : la productique, l'acoustique et les matériaux.

2 ETAT DE L'ART

La première étape du projet concerne la micro-géométrie du matériau, c'est-à-dire la matière dont seront constituées les barrières acoustiques.

La bibliographie scientifique, si elle ne fournit pas de solution directe à la problématique des écrans acoustiques à base de PUNR, donne néanmoins de nombreuses informations sur l'état de l'art, les différents liants et techniques de fabrication, et les performances que l'on peut espérer de ce type de matériaux.

L'étude technico-économique fournit des informations très utiles sur le marché des barrières acoustiques : volume, techniques mises en œuvre et coûts associés. Cette étude permet de définir le cahier des charges et les cibles en termes de performance acoustique et de coût de revient.

	Positionnement technique	Positionnement économique
Cible marché	A4	100 € / m ² de prix marché

En parallèle, les premiers prototypes de matériau ont été produits afin de tester les moules, les liants et les différents paramètres de fabrication. Diverses mesures ont été effectuées sur ces échantillons, afin de caractériser leur comportement acoustique, ce qui a permis d'établir le « point de fonctionnement », ainsi que d'anticiper leurs performances futures.

Ces premiers essais ont également mis en lumière quelques incertitudes quant à la représentativité des modèles utilisés pour simuler le matériau, ainsi que sur les bancs utilisés pour le caractériser. Il se pourrait que le matériau soit à la limite de validité des hypothèses communément admises pour ces modèles et ces bancs.

Faisant suite à l'étude bibliographique qui nous a donné quelques premières orientations, une campagne d'essais systématiques a été lancée afin d'optimiser le matériau. Un plan d'expérience a été établi à partir des résultats préliminaires, en faisant varier les paramètres de fabrication afin de pouvoir les relier aux paramètres physiques et aux performances acoustiques du matériau.

3 OPTIMISATION DU MATERIAU

3.1 *Démarche*

3.1.1 Validation du modèle

Tous les modèles étudiés lors de la phase de recherches bibliographiques utilisent un ou plusieurs paramètres qui sont difficiles ou impossibles à mesurer, tels que des facteurs de forme des pores, la taille moyenne des grains ou des pores. Le modèle de fluide équivalent, couramment utilisé au CTTM via le logiciel de calcul acoustique MAINE 3A, est retenu pour des raisons pratiques et économiques.

Les premiers résultats montrent une bonne capacité à simuler le comportement acoustique des matériaux dans la plupart des cas. La figure 1 montre la comparaison entre les mesures et les simulations dans trois cas : une « bonne » adéquation entre la mesure et la simulation, une adéquation « moyenne » et une « mauvaise » adéquation. L'adéquation moyenne est largement suffisante pour justifier l'utilisation du modèle de fluide équivalent. La mauvaise adéquation apparaît seulement dans quelques cas spécifiques, elle est expliquée plus loin. Dans tous les cas, la précision de ces ajustements ne remettra pas en cause les classements et les choix qui seront faits.

La figure 2 montre comment l'adéquation entre les mesures et les calculs évolue avec l'épaisseur de matériau considérée. Les paramètres d'entrée obtenus par recalage pour une épaisseur de 40 mm sont utilisés pour calculer l'absorption acoustique à des épaisseurs de 80 mm et 120 mm. Dans les deux cas, les simulations sont bien représentatives des mesures, ce qui valide l'utilisation du modèle par rapport au problème posé.

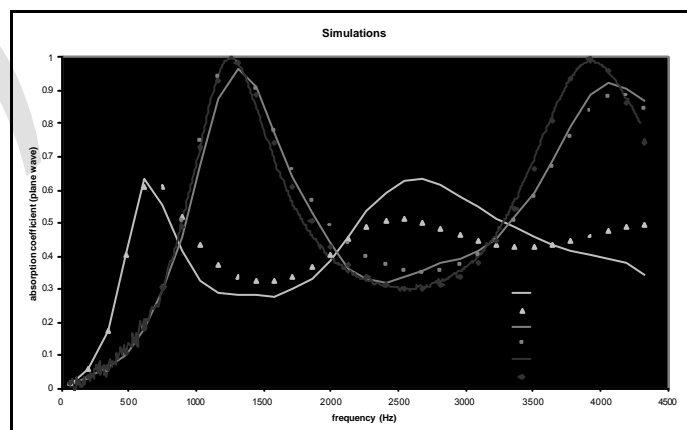


Figure 1

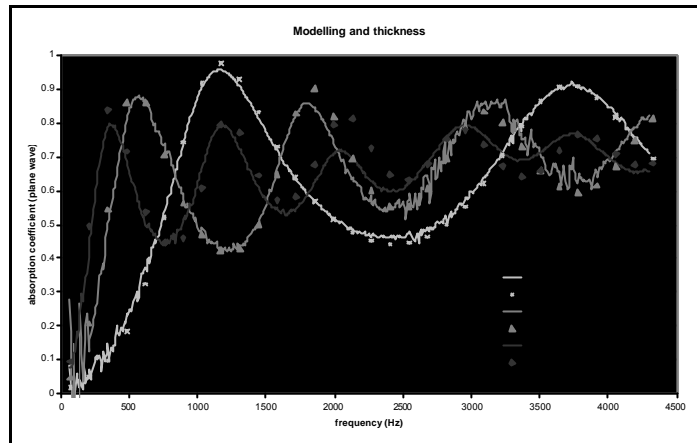


Figure 2

3.1.2 Méthodologie

Le but de ce travail est d'étudier l'influence du procédé d'agglomération sur l'absorption acoustique du matériau obtenu. La démarche est de fabriquer un certain nombre de blocs de matériau, en faisant varier les paramètres de production, et d'étudier leurs propriétés en termes de performance et de caractéristiques acoustiques. La liste des échantillons fabriqués est donnée au tableau 2.

3.1.2.a) Mesure

Un échantillon cylindrique est découpé de chaque bloc de matériau, et son absorption acoustique est mesurée au tube de Kundt de diamètre 45 mm. La résistivité au passage de l'air est également mesurée directement.

3.1.2.b) Caractérisation par ajustement

L'absorption acoustique est également calculée grâce à l'un des modèles disponibles dans le logiciel MAINE 3A. Les paramètres qui ne sont pas mesurés sont ajustés de façon à obtenir la meilleure correspondance possible entre la courbe mesurée et la courbe calculée. Le jeu de paramètres physiques retenu est celui pour lequel l'adéquation mesures/simulations est la meilleure. Une méthode d'ajustement automatique selon la méthode des moindres carrés a également été utilisée mais celle-ci ne modifie qu'à la marge la qualité de l'ajustement.

3.1.2.c) Prédiction

Le coefficient d'absorption est à nouveau calculé avec MAINE 3A, cette fois en conditions de champ libre, pour une épaisseur de 60 mm. Cette épaisseur donne un maximum d'absorption à 1000 Hz dans la majorité des cas, ce qui correspond au maximum du spectre de bruit routier. Le spectre obtenu est utilisé pour calculer l'indicateur unique de performance DL_a défini par la norme EN 1793-1.

3.1.2.d) Evaluation

L'indicateur DL_a (tableau 1) est choisi parce qu'il est l'indicateur standard international pour l'évaluation des barrières acoustiques. Il est calculé en comparant le spectre d'absorption du matériau en champ libre à un spectre de bruit routier normalisé, et en additionnant les différences. Le DL_a ne prend en compte que la surface absorbante de la barrière, et est mesuré dans des conditions de champ diffus en chambre réverbérante.

D'autres essais normalisés sont pratiqués pour évaluer le comportement de la barrière en champ libre, en prenant en compte la diffraction au sommet de la barrière.

Catégorie	DL_a (dB)
A0	Non déterminé
A1	< 4
A2	4 à 7
A3	8 à 11
A4	> 11

Tableau 1

Selon la norme, le DL_a doit être arrondi à la valeur entière la plus proche. Nous utilisons ici l'échelle continue afin de classer les échantillons et prototypes en fonction de leur performance.

Nature du liant		Cuisson								
		Quantité de liant			Quantité d'eau		60°C		100°C	
		5 parts	10 parts	15 parts	0%	20%	30 min.	60 min.	30 min.	60 min.
PX 14110	1	+			+		+			
	2	+			+			+		
	3	+			+				+	
	4	+			+					+
	5	+				+	+			
	6	+				+		+		
	7	+				+			+	
	8	+				+				+
	9		+		+		+			
	10		+		+			+		
	11		+		+				+	
	12		+		+					+
	13		+			+	+			
	14		+			+		+		
	15		+			+			+	
	16		+			+				+
	17			+	+		+			
	18			+	+			+		
	19			+	+				+	
	20			+	+					+
	21			+		+	+			
	22			+		+		+		
	23			+		+			+	
	24			+		+				+
Stobicoll	1	+			+		+			
	2	+			+			+		
	3	+			+				+	
	4	+			+					+
	5	+				+	+			
	6	+				+		+		
	7	+				+			+	
	8	+				+				+
	9		+		+		+			
	10		+		+			+		
	11		+		+				+	
	12		+		+					+
	13		+			+	+			
	14		+			+		+		
	15		+			+			+	
	16		+			+				+
	17			+	+		+			
	18			+	+			+		
	19			+	+				+	
	20			+	+					+
	21			+		+	+			
	22			+		+		+		
	23			+		+			+	
	24			+		+				+

Tableau 2 : liste des échantillons fabriqués

Nature du liant		Cuisson								
		Quantité de liant			Quantité d'eau		60°C		100°C	
		5 parts	10 parts	15 parts	0%	20%	30 min.	60 min.	30 min.	60 min.
Latex CR633	1	+			+		+			
	2	+			+			+		
	3	+			+				+	
	4	+			+					+
	5		+		+		+			
	6		+		+			+		
	7		+		+				+	
	8		+		+					+
	9			+	+		+			
	10			+	+			+		
	11			+	+				+	
	12			+	+					+
Craymull 2423	1	+			+		+			
	2	+			+			+		
	3	+			+				+	
	4	+			+					+
	5		+		+		+			
	6		+		+			+		
	7		+		+				+	
	8		+		+					+
	9			+	+		+			
	10			+	+			+		
	11			+	+				+	
	12			+	+					+

Tableau 2 (suite) : liste des échantillons fabriqués

3.1.3 Fabrication des échantillons

De nombreuses études ont été publiées sur le sujet de l'agglomération de granulats de caoutchouc, avec des liants organiques ou minéraux, et sur diverses applications des matériaux obtenus, ce qui atteste de la faisabilité du processus d'agglomération. Cependant, les études disponibles sur l'agglomération de granulats de caoutchouc sont orientées soit sur l'aspect acoustique, soit sur l'aspect chimique, mais rarement les deux. Deux conclusions intéressantes de ces études sont que la quantité de liant affecte négativement la performance acoustique, ainsi que la compression de la matière lors du processus d'agglomération.

Quatre liants sont étudiés : deux polyuréthanes (PX14110 et Stobicoll) et deux latex (CR633 et Craymull). Dans le cas des polyuréthanes, de l'eau est parfois ajoutée au mélange de façon à faire « mousser » le liant en consommant les isocyanates pour produire du gaz carbonique, dans le but d'augmenter la résistivité au passage de l'air du matériau. La réticulation complète est obtenue par cuisson.

Lors de la phase précédente, des échantillons avaient déjà été fabriqués. A cause de leur épaisseur de 11 mm, des doutes existaient quant à la représentativité des mesures effectuées sur ces échantillons : avec des grains d'un calibre de 4 mm en moyenne, une épaisseur de matériau contient seulement 3 grains de caoutchouc, ce qui diminue la confiance dans les mesures de résistivité et d'absorption en onde plane.

Les échantillons fabriqués lors de la phase 2 ont tous une épaisseur de 40 mm, ce qui élimine les doutes quant aux mesures.

3.2 Résultats

3.2.1 Liant et paramètres de fabrication

Les tableaux 3, 4 et 5 présentent les propriétés des échantillons utilisés lors de l'étude. Les figures 4, 5 et 6 présentent les coefficients d'absorption mesurés au tube de Kundt de 45 mm.

Les premiers échantillons mesurés suivent les axes de variation des paramètres de fabrication, à partir d'une référence établie à 10p. de liant, 20% d'eau, 60 minutes de cuisson à 60°C. La figure 3 représente les axes de variation des différents paramètres.

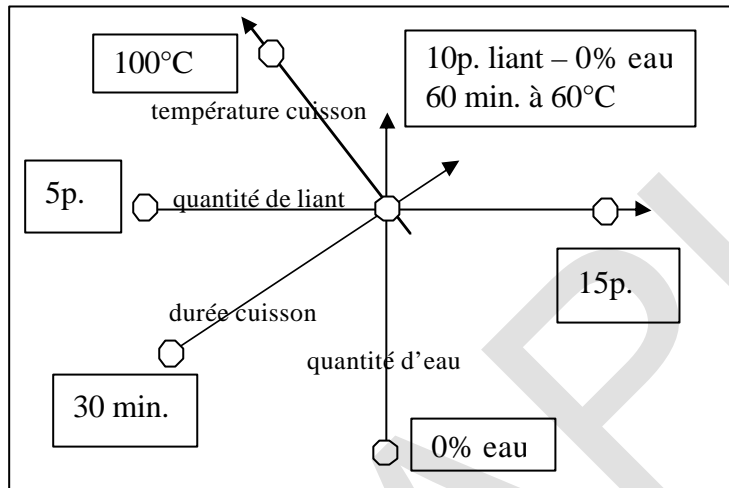


Figure 3 : espace de variation des paramètres de fabrication

Il est malaisé de déduire, à partir des mesures, des relations claires entre les paramètres de fabrication et les performances acoustiques. Les résultats obtenus avec les deux liants polyuréthane sont très similaires, que ce soit en termes de d'absorption acoustique en onde plane, de paramètres physiques ou de performance acoustique globale DL_a. Seul l'échantillon à 15 parts (ST22, Figure 16) diffère notablement des autres. Dans ce cas, le polyuréthane prend la forme d'une mousse qui forme des pores de petite taille dans les cavités entre les grains de caoutchouc. Le matériau comprend alors deux échelles de porosité : une échelle plus grande liée à la taille des grains et aux volumes interstitiels, et une échelle plus petite liée à la mousse qui remplit ces volumes interstitiels. Il résulte une augmentation de la tortuosité et de la résistivité qui affecte le coefficient d'absorption de façon adverse par rapport au DL_a. Dans ce cas particulier, le modèle de fluide équivalent utilisé pour calculer l'absorption acoustique s'avère inadapté, parce que le matériau ne vérifie plus les hypothèses générales de ce modèle.

Certains échantillons n'ont pas été fabriqués avec les liants latex, d'une part parce que les échantillons à 5 parts sont trop friables pour être découpés proprement, d'autre part parce que l'addition d'eau n'apporte rien dans ce cas. Les résultats sont très similaires à ceux obtenus avec les liants polyuréthanes, avec le même comportement atypique des échantillons à 15 parts de liant.

Ces résultats confirment que la quantité de liant est un paramètre adverse à la performance acoustique. Le liant doit être ajouté dans la plus petite quantité qui assure une bonne cohésion mécanique du matériau. Les résultats montrent également que les influences de la cuisson et du type de liant utilisé sont peu importantes. Les critères de choix pour le liant et le procédé d'agglomération seront donc principalement économiques.

Compte tenu de ces résultats, il n'est pas nécessaire de prendre en compte les échantillons qui ne se trouvent pas sur les axes de variation des paramètres (figure 3) dans la suite de l'étude.

Echantillon	Epaisseur mm	Résistivité Nsm ⁻⁴	Porosité Ø	Tortuosité Ø	? µm	?' µm	Composition	DL _a (60 mm)
PX6	42	4 503	0,4	1,70	130	700	5p., 20% water 60 min. @ 60°C	4,41
PX10	38,5	8 888	0,42	2,00	120	700	10p., 0% water 60 min. @ 60°C	4,56
PX13	42,5	5 028	0,45	2,10	200	700	10p., 0% water 30 min. @ 60°C	4,14
PX14	42	4 638	0,40	2,20	220	700	10p., 20% water 60 min. @ 60°C	3,81
PX16	42	4 925	0,45	2,25	250	700	10p., 0% water 60 min. @ 100°C	3,84
PX22	42	6 614	0,42	2,15	170	700	15p., 20% water 60 min. @ 60°C	3,23

Tableau 3 : liant polyuréthane PX14110

Echantillon	Epaisseur mm	Résistivité Nsm ⁻⁴	Porosité Ø	Tortuosité Ø	? µm	?' µm	Composition	DL _a (60 mm)
ST6	41,5	3 292	0,45	1,80	185	700	5p., 20% water 60 min. @ 60°C	4,17
ST10	42,0	5 688	0,42	1,85	185	700	10p., 0% water 60 min. @ 60°C	4,12
ST13	42,0	4 549	0,42	2,05	180	700	10p., 20% water 30 min. @ 60°C	4,14
ST14	43,2	2 618	0,45	1,70	195	700	10p., 20% water 60 min. @ 60°C	4,12
ST16	42,6	5 529	0,45	1,90	190	700	10p., 20% water 60 min. @ 100°C	4,23
ST22	40,5	24 672	0,39	3,1	45	700	15p., 20% water 60 min. @ 60°C	3,33

Tableau 4 : liant polyuréthane Stobicoll

Echantillon	Epaisseur mm	Résistivité Nsm ⁻⁴	Porosité Ø	Tortuosité Ø	? µm	?' µm	Composition	DL _a (60 mm)
CR6	43	3 938	0,43	2,20	190	700	10p., 0% water 60 min. @ 60°C	3,81
CR10	42,5	9 517	0,40	4,5	150	700	15p., 0% water 60 min. @ 60°C	2,88
CRAY6	44	2 849	0,42	1,9	225	700	10p., 0% water 60 min. @ 60°C	4,09
CRAY10	42,5	5 653	0,45	1,8	215	700	15p., 0% water 60 min. @ 60°C	4,05

Tableau 5 : liants latex CR633 et Craymul

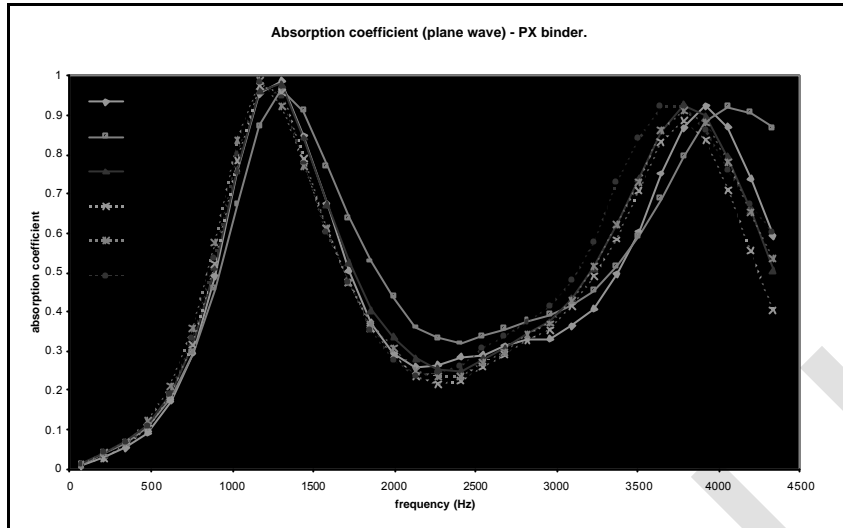


Figure 4

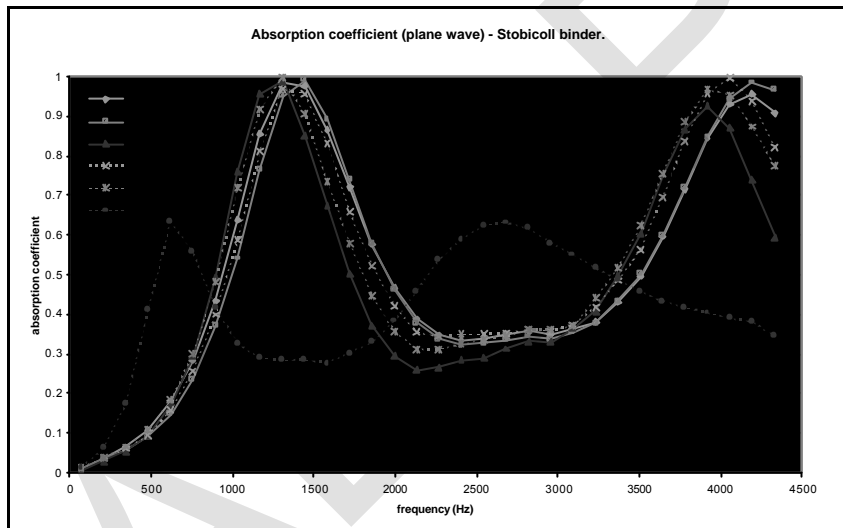


Figure 5

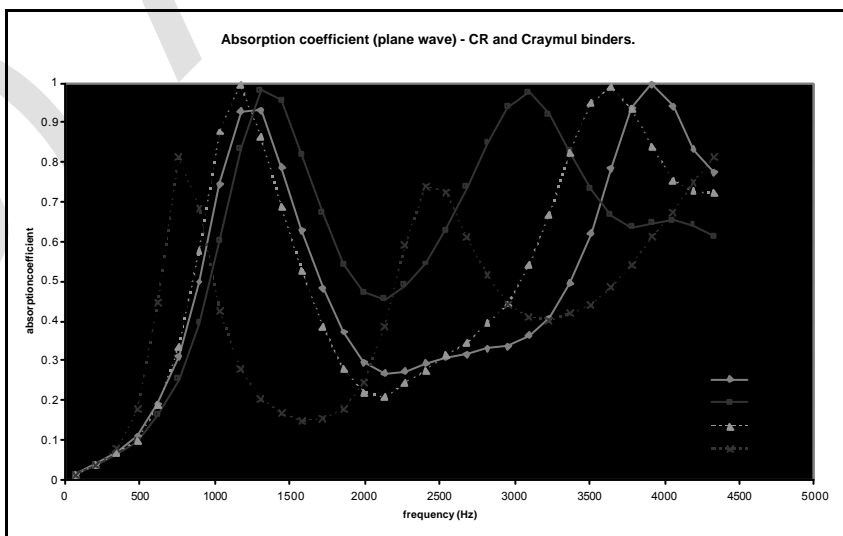


Figure 6

3.2.2 Taille des grains

Ce paramètre fournit les résultats les plus intéressants. Le tableau 6 et la figure 7 présentent les résultats obtenus pour des variations de la taille des grains utilisés. Les différentes granulométries sont obtenues par tamisage au CTTM. Le mélange d'origine est composé de 12% de grains calibre 0-2 mm, 80% de grains 24 mm, 8% de gains 46 mm. Des essais complémentaires sont effectués sur des calibres 0-1 mm et 1-2 mm.

Les données du tableau 6 montrent qu'une augmentation de la taille des grains conduit à une augmentation de la longueur caractéristique visqueuse et une diminution de la résistivité au passage de l'air, ce qui est cohérent avec l'augmentation de la taille des pores. La porosité augmente alors que la taille des grains diminue.

Les valeurs du DL_a montrent que la meilleure performance acoustique est obtenue avec le calibre 0-2 mm. Avec des granulométries plus élevées, le matériau se comporte comme un milieu de propagation (fluide équivalent) faiblement dissipatif, les courbes d'absorption (figure 8) présentent un comportement résonant de type quart d'onde (pics d'absorption très marqués). En comparaison, les petites granulométries donnent des courbes d'absorption aux résonances moins marquées (figure 8), voire très atténuées dans le cas du calibre 0-1 mm, ce qui traduit une dissipation plus importante à l'intérieur du matériau. L'absorption n'en est pas augmentée pour autant, car le matériau offre alors une trop grande résistance à la propagation des ondes acoustiques. Ces résultats confirment une étude antérieure qui montrait que les performances acoustiques diminuent pour des grains de taille inférieure à 1 mm [M. J. Swift, P. Bris and K. V. Horoshenkov, "Acoustic absorption in re-cycled rubber granulate", Applied Acoustics 57 (1999) 203-212].

Il existe donc un compromis entre l'effet quart d'onde et les effets dissipatifs. L'optimum en termes d'absorption est obtenu pour la granulométrie de calibre 0-2 mm (figure 7).

Echantillon	Epaisseur mm	Résistivité Nsm^{-4}	Porosité \emptyset	Tortuosité \emptyset	τ μm	τ' μm	Granulométrie mm	DL_a (60 mm)
ST10	42,0	5 688	0,42	1,85	185	700	mélange	4,12
alia39-2	41,1	58 904	0,50	1,90	45	700	0-1	4,78
alia39-1	42,5	23 275	0,44	1,90	85	700	1-2	4,95
ST26	42,5	14 190	0,51	1,90	100	700	0-2	5,37
ST27	43,5	6 011	0,47	2,00	230	700	2-4	4,44
ST28	43,5	2 937	0,39	2,00	245	700	4-6	3,58

Tableau 6: influence de la granulométrie, liant Stobicoll

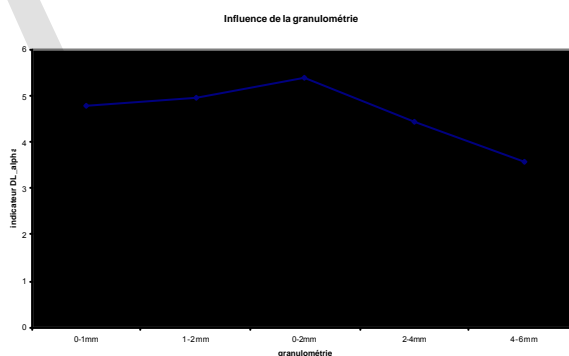


Figure 7

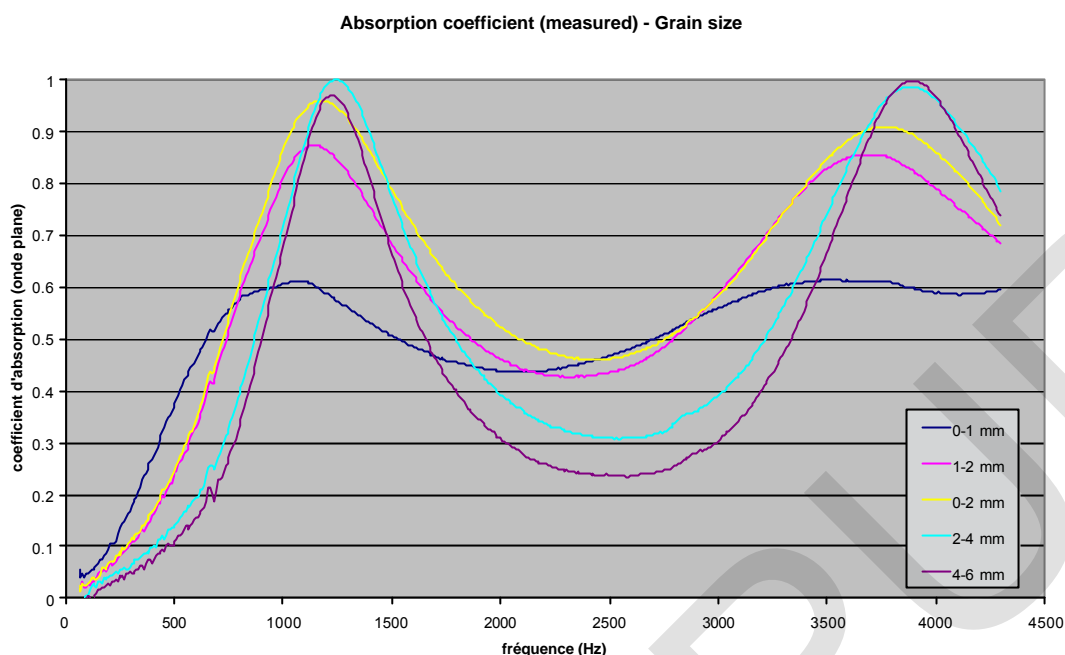


Figure8 : influence de la granulométrie sur le coefficient d'absorption en ondes planes

3.3 Conclusion

Ce chapitre présente les résultats de l'étude des propriétés acoustiques de matériaux granulaires fabriqués à partir de granulats de pneus usagés non-réutilisables liés par un liant organique.

Le comportement acoustique de ces matériaux peut être prédit avec un modèle de fluide équivalent classique.

Il est montré que de tous les paramètres de fabrication, la quantité de liant est le plus important, à cause des modifications de la micro-géométrie du matériau : dimension des pores diminuée, double échelle de porosité, résistivité et tortuosité augmentées. Pour les mêmes raisons, la granulométrie est également un paramètre déterminant. Les phénomènes physiques d'absorption sont différents selon les tailles des grains utilisés, et il existe une granulométrie optimale en termes d'absorption acoustique. Cet optimum est atteint pour le calibre 0-2 mm.

A ce stade, le coût matière première, sans le coût du procédé de mise en œuvre, est estimé à 30 € / m². Les performances acoustiques mesurées et les valeurs du DLa sont obtenues pour un matériau à surface plane.

	Positionnement technique	Positionnement économique
Cible marché	A4	110 à 130 € / m ² de prix marché
Situation du projet en fin de phase 2	A2	30 € / m ² matières premières seules

Les performances acoustiques peuvent être grandement améliorées en donnant un relief au matériau, comme des «vagues», des créneaux, un «gaufrage». La suite de l'étude concerne les façons d'utiliser le matériau pour construire des barrières acoustiques, et les moyens d'augmenter l'absorption acoustique en travaillant sur la forme et le relief des barrières.

4 OPTIMISATION DE L'ABSORPTION DE LA BARRIERE

4.1 Principe

La phase précédente du projet a permis de choisir une formulation du matériau qui lui confère des propriétés acoustiques optimales en termes d'absorption et de coût de revient. La suite du travail consiste à optimiser la forme de la barrière. Le critère d'optimisation reste l'indicateur normalisé DL_a , c'est-à-dire que le spectre d'absorption doit avoir une répartition en fréquence qui corresponde au bruit routier, et des valeurs d'absorption élevées.

Le principe est de donner à la surface du matériau une forme particulière, qui augmente l'absorption acoustique en champ diffus. En l'absence de données scientifiques permettant de prédire l'absorption acoustique d'une géométrie donnée, la méthode retenue est de fabriquer plusieurs prototypes selon des géométries différentes, et de les mesurer en champ diffus.

4.2 Fabrication des prototypes

Les prototypes à petite échelle sont fabriqués au CTTM. Les granulats et le liant sont mélangés dans une bétonnière, puis le mélange est coulé dans des moules en bois spécialement fabriqués (figures 8 et 9). On dispose de 4 moules réutilisables de 50 cm de côté; les éléments définissant la géométrie sont amovibles. Les moules sont passés à l'étuve par deux, une heure à 60°C environ.

Les granulats utilisés proviennent de la société RBSI, calibre 2-4 mm. Au moment de la fabrication des premiers échantillons, ce calibre est le plus petit disponible à un prix raisonnable. Il s'est avéré par la suite que, les techniques de broyage évoluant, des calibres plus petits pourraient être disponibles au même prix. Un complément d'étude est effectué au tube à ondes stationnaires (voir 3.4), mais les très petits calibres étant obtenus par tamisage de calibres plus élevés (donc en petites quantités) aucun prototype n'est fabriqué.

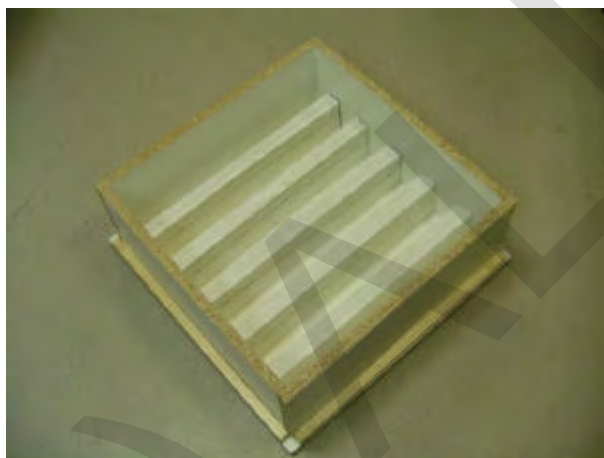


Figure 9



Figure 10

4.3 Mesure

La caractérisation des barrières acoustiques est décrite dans la norme NF EN 1793 (1 à 3) : « Dispositifs de réduction du bruit du trafic routier : méthode d'essai pour la détermination de la performance acoustique ». Cette norme décrit le calcul de l'indicateur de performance acoustique en absorption DL_a , et de l'indicateur de performance acoustique en isolation DL_r .

Ces calculs sont basés sur les mesures décrites dans les normes EN 20354 pour l'absorption, et EN ISO 140-3 pour l'isolation.

Les normes imposent de mesurer l'absorption acoustique dans une salle réverbérante de 150 m³ au moins, avec des échantillons d'une surface de 10 m² au moins. Cette surface n'est pas réalisable à ce stade de l'étude. L'absorption est donc mesurée sur des échantillons de 1 m², dans une cabine réverbérante de 22 m³. Ce moyen d'essai est couramment utilisé dans l'industrie automobile pour les mesures d'absorption.

Des essais de validation ont été menés au CTTM :

-E. Portier, F. Fohr, N. Poulain : "Using uncertainties to qualify a small reverberation chamber for acoustic absorption coefficient measurements", Managing uncertainty in noise measurement and prediction, Symposium Le Mans, 2005

-F. Fohr, E. Portier, J.-C. Le Roux, N. Poulain : " Qualification d'une petite chambre réverbérante pour la mesure du coefficient alpha sabine", Congrès SIA – CTTM Confort des véhicules 2004.

4.4 Référence : surface plane

En même temps que le premier prototype crénelé, un premier échantillon plan est fabriqué, dans le but de disposer d'une référence pour les autres essais de géométrie. La section du premier prototype crénelé *alia2* est reprise d'un modèle concurrent. La hauteur du premier prototype plan *alia1* est calculée de façon à conserver la même masse surfacique.

Le prototype *alia1* donne un DLa de 7,78 (Figure 11). Cette valeur est nettement supérieure à celle prédite par le logiciel de calcul pour une épaisseur de 87,65 mm (environ 5,2). Cette surestimation peut provenir d'effets de diffraction importants sur les bords de l'échantillon, ou bien d'une grande perturbation du champ acoustique à l'intérieur de la cabine, compte tenu de la grande épaisseur de l'échantillon relativement aux dimensions de la cabine.

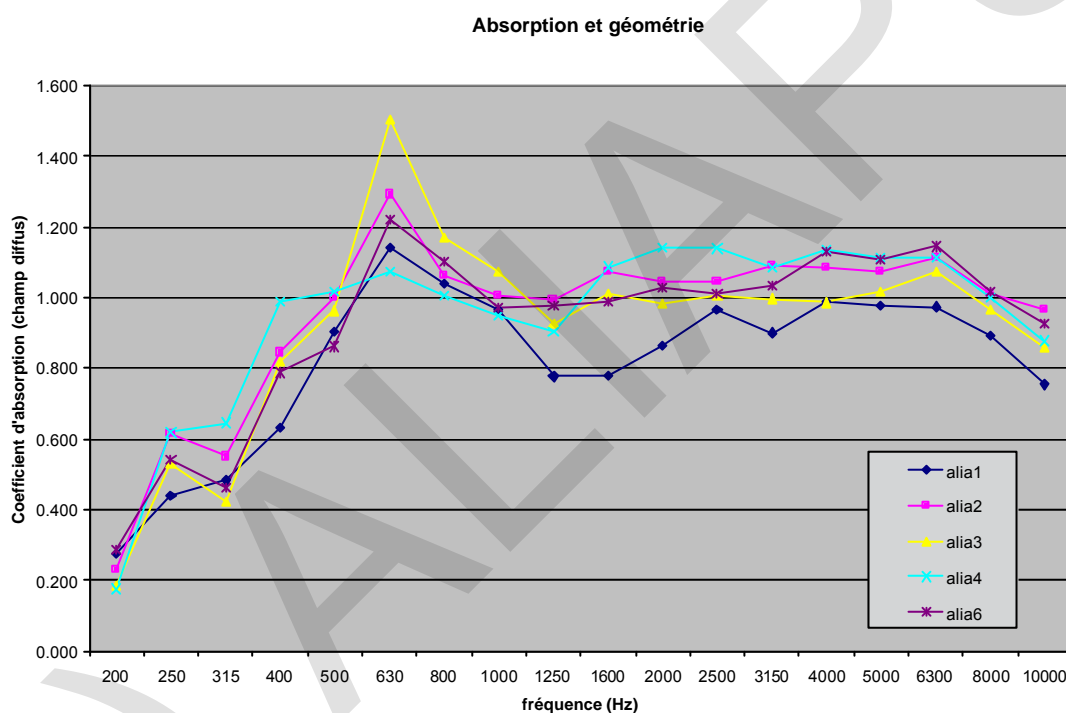


Figure 11 : absorption des prototypes

4.5 Créneaux

La surface en créneaux est la plus répandue pour les applications en barrières anti-bruit. Trois géométries sont testées (Figure 12). La première géométrie (prototype *alia2*) est reprise d'un modèle concurrent. Cette géométrie fournit un DLa de 13,93, la courbe d'absorption présente un pic de 1,14 à 630 Hz, puis les valeurs sont comprises entre 0,8 et 1 (Figure 11).

Les deux géométries suivantes ont pour but d'observer les tendances lorsque l'on réduit ou que l'on amplifie l'importance des créneaux : leur hauteur, relativement à la hauteur totale de l'échantillon, est diminuée (*alia3*) ou augmentée (*alia4*). Les variations sont faites à isovolume : pour un même volume total de matière de $8,6 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{m}^2$.

Le prototype **alia3** obtient un DLa de 13,92. La courbe d'absorption présente un pic très marqué à 630 Hz, puis des valeurs d'environ 1 (figure 11). Le prototype **alia4** obtient un DLa de 12,24, mais l'allure de la courbe est assez différente : le pic d'absorption à 630 Hz est écrêté, et les valeurs après un creux à 1 250 Hz, sont de l'ordre de 1,1 (figure 11).

La diminution des motifs de la géométrie a donc pour effet d'amplifier l'allure de la courbe d'absorption notamment le pic visible à 630 Hz, alors l'augmentation des motifs a tendance à lisser la courbe d'absorption.

Ces tendances peuvent s'expliquer par les phénomènes absorbants mis en œuvre : le prototype **alia3** se rapproche d'un échantillon plan, et l'absorption se fait par dissipation visqueuse et thermique lors de la propagation de l'onde acoustique dans le matériau. Il en résulte une allure de la courbe d'absorption de type quart d'onde, classique pour les milieux de propagation faiblement dissipatifs. Le prototype **alia4** favorise la diffusion, en réduisant les possibilités de propagation uniforme de l'onde acoustique dans le matériau. La courbe d'absorption perd donc son caractère résonant.

Vis-à-vis du problème posé, la meilleure performance est apportée par le prototype **alia2**, comme l'indiquent les valeurs de l'indicateur DLa. A quantité de matière égale, les prototypes **alia2** et **alia3** démontrent des performances équivalentes.

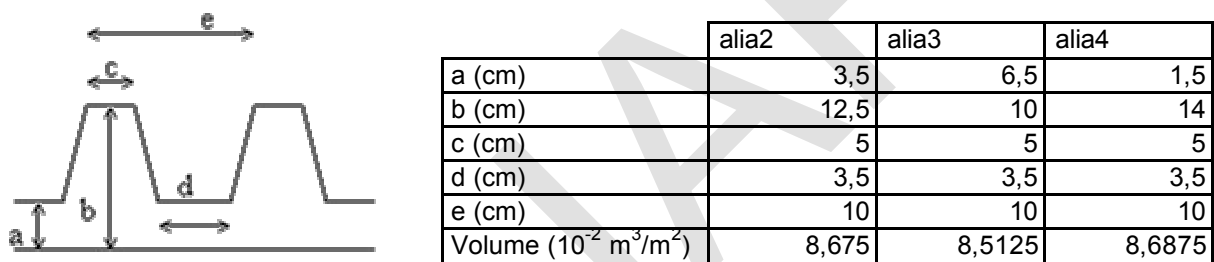


Figure 12 : géométries en créneaux

4.6 Diffuseur de Schroeder

La littérature préconise un autre type de géométrie en créneaux : le diffuseur de Schroeder. Un diffuseur est un élément permettant de renvoyer une onde acoustique d'incidence donnée dans toutes les directions de l'espace de façon homogène (figure 14).

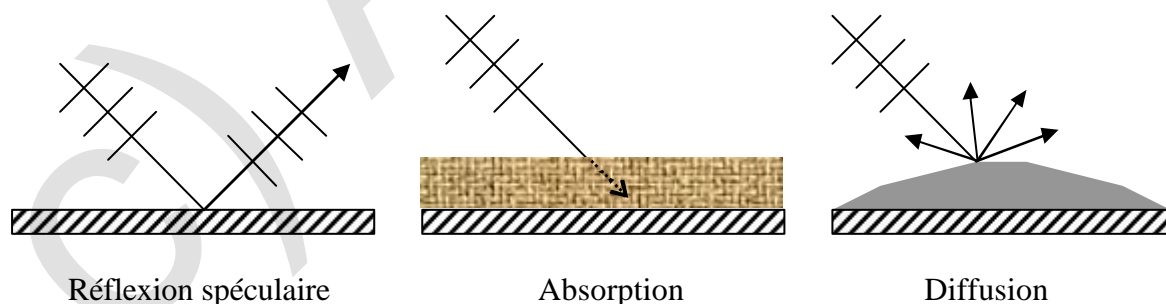


Figure 14 : Illustration des comportements d'une onde acoustique rencontrant différents types de paroi

Les diffuseurs peuvent être réalisés à partir de surfaces courbes ou à facettes. Chaque «facette» renverra les ondes acoustiques dans une direction différente à condition que leur taille soit supérieure à la longueur d'onde. Ce type de diffuseur n'apporte pas d'absorption significative. Un autre type de diffuseur peut présenter des propriétés d'absorption intéressantes. Il s'agit du diffuseur de Schroeder (Schroeder, 1979), aussi appelé QRD («quadratic-residue diffuser») : il est constitué d'une séquence de cellules de profondeurs différentes. La séquence des profondeurs est déterminée à partir de la suite :

$$s_n \equiv n^2 \text{ modulo } N,$$

avec n entier et N un nombre premier. Pour $N=7$, on a la séquence suivante : 0,1,4,2,2,4,1. La géométrie correspondante est donnée à la figure 15.

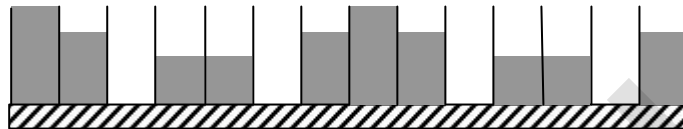


Figure 15 : Diffuseur de Schroeder de période $N=7$ (2 séquences)

La profondeur de la plus grande cellule d_{max} correspond à une demi-longueur d'onde de la fréquence d'utilisation souhaitée f_d , soit :

$$d_{max} \equiv \frac{c_0}{2f_d},$$

avec c_0 la célérité du son (342 m/s). La bande de fréquence utile est comprise entre $f_{min} = f_d/2$ et $f_{max} = c_0/w$, avec w la largeur des cellules (Warner, 1995). La largeur optimale des cellules est donnée par :

$$w \equiv \frac{c_0}{f_d N}.$$

Par exemple, pour une fréquence d'utilisation de 1 000 Hz, on a une profondeur maximum de 17 cm, avec une largeur de 5 cm. La bande de fréquence utile est comprise entre 500 Hz et 7 000 Hz pour une période de $N=7$.

Hormis l'effet de diffusion, on observe un effet d'absorption. Cet effet est dû aux pertes au niveau des parois, de la même façon que pour un résonateur quart d'onde. La répartition pseudo-aléatoire permet d'étaler l'effet absorbant sur une plus large bande de fréquence.

Le prototype **alia6** atteint un DLa de 11,19 (Figure 11), ce qui est décevant par rapport aux échantillons à géométrie régulière. Par rapport aux autres prototypes à créneaux, le volume du prototype **alia6** est légèrement inférieur, à $8 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{m}^2$, au lieu de $8,6 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{m}^2$.

4.7 Conclusion

Comme attendu, l'implémentation d'une géométrie de la surface des prototypes augmente drastiquement leur absorption. De très bons résultats sont atteints à partir de plusieurs géométries simples ou plus élaborées : le classement A4 est atteint. Ces excellents résultats amènent deux observations.

Les performances obtenues étant supérieures à l'objectif commercial (le classement A4 est obtenu à partir d'un DLa de 11), il est certainement possible de réduire la quantité de matière utilisée tout en maintenant un classement A4. Le coût de fabrication des barrières se verrait ainsi diminué. Il convient de vérifier que la baisse du DLa n'est pas trop importante par rapport à la réduction du volume de matière utilisé. D'autre part, il est également envisageable de modifier l'objectif commercial et de viser un classement en classe "super absorbant" (DLa > 15) en préparation dans le cadre de la prochaine révision de la norme NF EN 14388

Tous ces résultats sont obtenus par des mesures en cabine acoustique, qui est le moyen le plus adapté à ce stade de l'étude. Si ce type de mesure a bien été validé, le risque de surestimer l'absorption est réel. Les phénomènes de diffraction sur les arêtes à la périphérie du matériau, le champ diffus modifié par la forte absorption et la grande épaisseur du matériau relativement aux dimensions de la salle, sont des causes connues de la surestimation de l'absorption, mais difficiles à corriger à l'heure actuelle. Il est impératif de valider ces résultats par des mesures en grande salle, sur des prototypes à plus grande échelle. Ces essais font l'objet de la dernière partie du projet.


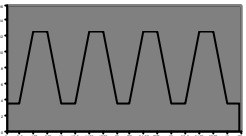
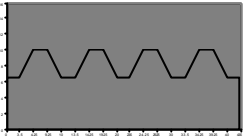
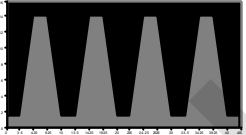
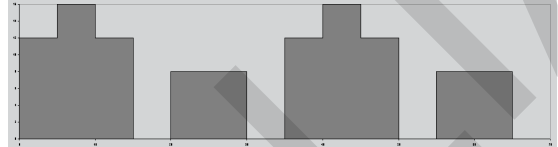
	Alia1 DLa = 7,78 (ép. 88 mm) Classement : A3 Vol. $8,675 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{m}^2$
	Alia2 DLa = 13,93 Classement : A4 Vol. $8,675 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{m}^2$
	Alia3 DLa = 13,92 Classement : A4 Vol. $8,512 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{m}^2$
	Alia4 DLa = 12,82 Classement : A4 Vol. $8,687 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{m}^2$
	Alia6 DLa = 11,19 Classement : A4 Vol. $8,000 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{m}^2$

Figure 16 : récapitulatif des performances

5 TENUE AU FEU

5.1 Premiers essais

Un aspect contraignant pour les barrières acoustiques est la tenue au feu, particulièrement dans le cas où le matériau utilisé est du caoutchouc. Les risques notables sont les feux de broussailles et les accidents de circulation (cf. norme NF EN 1794-2).

Deux additifs proposés par la société *Les produits de la Lucette* ont été évalués :

- Plastriox AODB : un mélange à base de trioxyde d'antimoine et de dérivé de brome,
- et Plastriox AZB : un mélange à base de trioxyde d'antimoine, de dérivé de brome et de borate de zinc.

Toujours pour 90 parts de granulats de PUNR, 10 parts de liant PU, des teneurs variables en additifs ont été ajoutées : 10, 20 et 30 parts de AODB ainsi que 10 et 20 parts de AZB (l'empâtage à 30 parts n'ayant pas été possible). La tenue au feu des échantillons a été évaluée par la société Les Produits de la Lucette conformément au test UL94 (Figure 17). Ce test consiste à enflammer l'échantillon à l'aide d'un chalumeau puis de retirer le chalumeau afin de suivre la combustion spontanée de l'échantillon.

Trois classes sont alors définies :

- 0 : extinction de la combustion en moins de 10 secondes,
- 1 : extinction de la combustion en moins de 30 secondes,
- 2 : extinction de la combustion en plus de 30 secondes,
- 3 : combustion qui ne s'éteint pas d'elle-même.

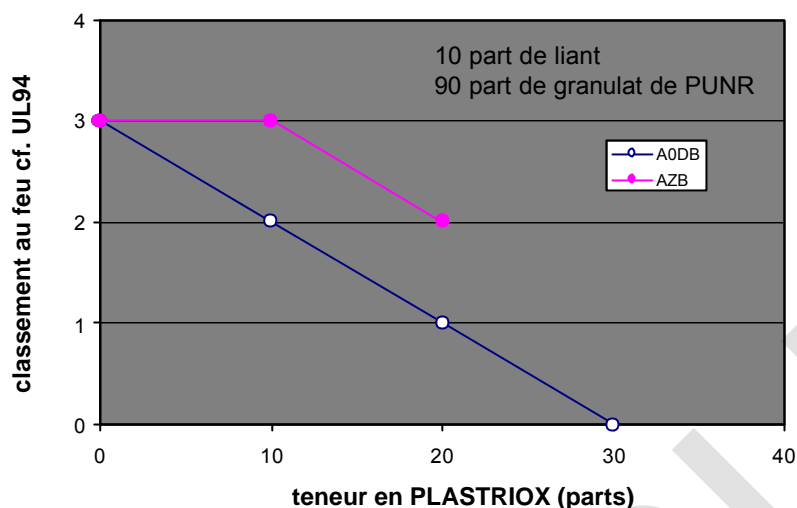


Figure 17 : tenue au feu

Dès 10 parts d'AODB la combustion s'arrête spontanément.

5.2 Toxicologie

Le Plastriox AODB, mélange à base de trioxyde d'antimoine et de dérivé de brome est malheureusement d'un point de vue toxicologique peu recommandable. En particulier il est classé comme Xn : Nocif et R40 : avec effet cancérigène suspecté (preuves insuffisantes), R50/53 : très toxique pour les organismes aquatiques. C'est donc un « CMR », « Cancérigène Mutagène Reprotoxique » de classe 3 ! Il impose des mesures de précaution draconienne : S22, ne pas respirer, S36/37, porter des vêtements de protection et des gants appropriés....

Nous avons donc entrepris de le substituer par d'autres composés moins toxiques.

6 INDUSTRIALISATION

6.1 Premiers aspect économique

Les données à présent disponibles sur la composition du matériau et le procédé de fabrication permettent d'estimer plus précisément le coût de revient des barrières. Un devis de la société RBSI pour la fabrication en grande quantité du matériau a été demandé: le coût est de 50€/m², prenant en compte les matières et le procédé d'agglomération. Cette évaluation est donnée pour une brique de 8 cm d'épaisseur et un coût matières premières de 30 €/m². A ce coût, il faut ajouter l'agent anti-feu (5,5 €/Kg), soit de l'ordre de 20 €/m² de plus.

Pour une brique de 1m², 8 cm d'épaisseur, 50% de porosité, soit 40Kg, le coût final est de l'ordre de 70 €/m².

	€/Kg additif	Teneur %	Contribution / m ² brique
PUNR	0,2	80% soit 32 Kg	6,4
PU	5	10% soit 4 Kg	20
AODB	5,5	10% soit 4 Kg	22
procédé			20
total			68,4 €/m²

Ce tarif ne comprend pas les éléments de structure qui seront inclus dans la barrière : support rigide, fondations..., ni les coûts de mise œuvre (main d'œuvre). C'est très intéressant comparé à la cible de 100€/m² (coût moyen des barrières absorbantes).

6.2 Brevet

La technologie développée a fait l'objet d'un dépôt de brevet. En particulier, nous avons pris le soin de bien positionner cette invention par rapport aux technologies concurrentes décrites dans les brevets suivants :

- FR2774940 de la société CAPREMIB sur une granulométrie particulière des copeaux de bois dans le cadre de la technologie béton / bois,
- le brevet Canadien CA2179145 qui décrit un composite granulat de PUNR, liant PU mais qui est non poreux,
- le brevet FR2829487 de la société RINCENT BTP qui revendique un composite béton / granulat de PUNR.

Nous avons défini le ratio $R = \text{granulat de PUNR} / \text{liant}$ en poids qui dans notre cas est très supérieure à 2,5 et qui permet d'atteindre des performances acoustiques inégalés comme le montre le graphique suivant. Sur ce graphique le DL_a est donné pour une plaque plate de 8 cm d'épaisseur.

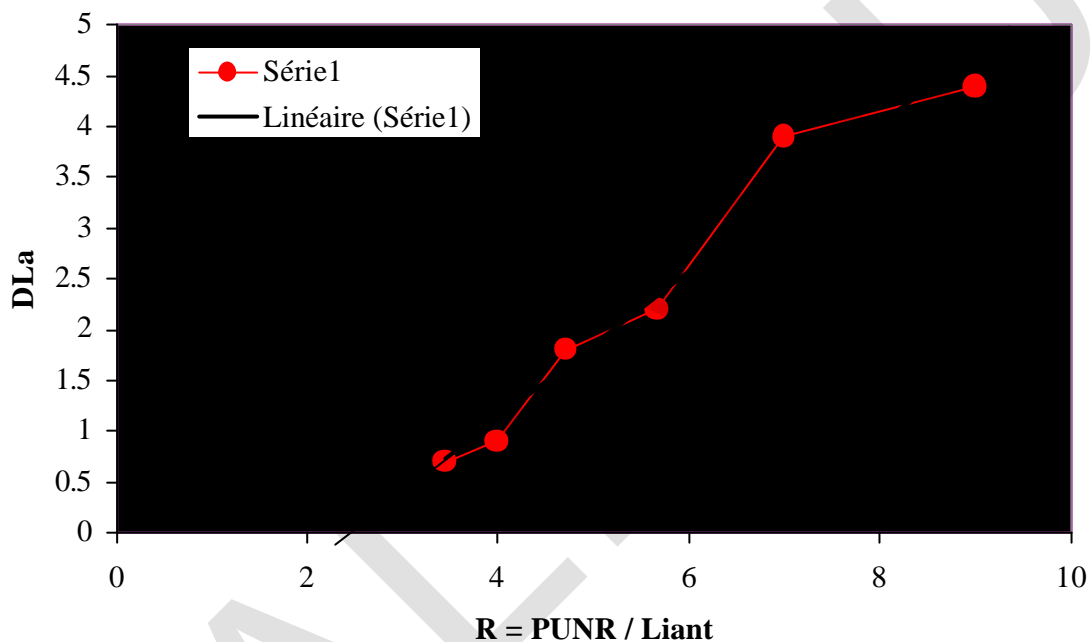


Figure n°18 : performance acoustique

6.3 Evaluation technico-économique à l'échelle industrielle

La société CAPREMIB est en charge de l'évaluation technico-économique à une échelle industrielle. Cette société de 250 salariés, répartis sur 5 sites, produit des pièces de béton armé moulé (certains des moules sont chauffants) : poutres (précontraintes ou pas), dalles, escaliers et des murs antibruit de type béton bois. Les marchés ciblés sont les infrastructures routières, les infrastructures ferroviaire et certaines applications industrielles voire dispositifs de réduction des bruits en site urbain ou péri urbain, tels que mobiliers urbains, écrans anti bruit de hauteur < 2.00 m.

Les panneaux de béton bois sont aujourd'hui produits principalement sous deux formes de procédé qui correspondent aux 2 grandes familles des dispositifs de réduction des bruits aériens routiers prévus par la norme NF EN 14388, à savoir :

- les "parements" qui sont généralement des éléments absorbant de dimensions variables de 0.50 m à 2.00 m rapportés sur une structure indépendante et fixés par tous moyens mécaniques ou chimiques. Ces éléments absorbants peuvent être réalisés par démoulage immédiat de manière automatisée, ou par démoulage différé selon un procédé plus artisanal
- les "éléments" soit autostables, soit supportés empilables ou soit supportés toute hauteur, généralement de grandes dimensions variables de 4.00 m à 6.00 m pour la longueur et de 1.00 m à 4.00 m pour la hauteur sont constitués d'un bicouche comportant une couche absorbante et une couche structurelle en béton armé, la liaison entre les 2 couches étant réalisée par bétonnage du béton frais de structure sur la couche absorbante et insertion de connecteurs métalliques ou autres en sécurité. Compte tenu de leurs dimensions, ces éléments sont réalisés par démoulage différé selon un procédé traditionnel en préfabrication lourde.