



**HAL**  
open science

# Fiabilité des prédictions vibro-acoustiques d'un modèle SEA dans un contexte d'évaluation subjective du confort acoustique automobile

Valentin Miqueau, Etienne Parizet, Sylvain Germès

## ► To cite this version:

Valentin Miqueau, Etienne Parizet, Sylvain Germès. Fiabilité des prédictions vibro-acoustiques d'un modèle SEA dans un contexte d'évaluation subjective du confort acoustique automobile. 16ème Congrès Français d'Acoustique, CFA2022, Société Française d'Acoustique; Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, Apr 2022, Marseille, France. hal-03847803

**HAL Id: hal-03847803**

**<https://hal.science/hal-03847803>**

Submitted on 17 Nov 2022

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



16<sup>ème</sup> Congrès Français d'Acoustique  
11-15 Avril 2022, Marseille

## Fiabilité des prédictions vibro-acoustiques d'un modèle SEA dans un contexte d'évaluation subjective du confort acoustique automobile

V. Miqueau <sup>a,b</sup>, E. Parizet<sup>a</sup>, S. Germes <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Laboratoire Vibrations Acoustique, INSA Lyon, 25 bis Avenue Jean Capelle, 69100 Villeurbanne

<sup>b</sup> Saint-Gobain Recherche Compiègne (SGRC), 1 rue de Montluçon, 60777 Thourotte,



Dans l'industrie automobile, le confort acoustique est un argument de vente majeur. Afin d'accompagner les constructeurs automobiles dans cette recherche de confort, Saint-Gobain propose des vitrages à haute performance acoustique.

La caractérisation du confort acoustique reposant sur l'utilisation de prototypes, elle arrive tard dans design des véhicules.

Saint-Gobain, développant déjà des modèles numériques de prédiction du bruit intérieur cabine engendré par une excitation moyennes-hautes fréquences de type bruits aériens, s'intéresse actuellement à la possibilité d'utiliser ces mêmes modèles pour réaliser des évaluations subjectives bien plus tôt dans le processus de conception des vitrages.

Une étude de perception subjective a été réalisée auprès d'un jury au Laboratoire Vibrations Acoustique dans le but de comparer des sons auralisés à partir du modèle avec ceux auralisés à partir de mesures. En a été conclu que la simulation surestimait la pression au niveau de la tête du conducteur ce qui était perçu par le jury. L'interaction entre les joints et le vitrage, non prise en compte par le modèle, peut expliquer ce phénomène en produisant des dissipations supplémentaires ignorées jusqu'ici. Une campagne d'essais a été menée au laboratoire de Saint-Gobain Compiègne pour explorer cette hypothèse. Ses résultats ne sont pas résumés dans cet article mais seront présentés lors du congrès.

## 1 Introduction

Du fait des récentes avancées technologiques, la prise en compte du confort acoustique est devenue une des étapes fondamentales de la conception d'un véhicule. Ainsi, les mousses d'isolation acoustique, l'utilisation d'intercalaires de PVB dans les vitrages ou encore l'utilisation des moteurs électriques contribuent à rendre les véhicules automobiles de plus en plus silencieux. Désormais, la qualité même du son est devenue un des critères de choix du consommateur qui lui permettra éventuellement de développer un affect pour le véhicule [1]. Par conséquent, les constructeurs automobiles se doivent d'améliorer constamment l'environnement acoustique de leurs voitures [2] et ont donc, durant les trois dernières décennies, travaillé à intégrer l'aspect psycho-acoustique au plus tôt dans le processus de conception.

Plusieurs études ont été menées afin de renforcer les connaissances en psycho-acoustique et de les adapter au domaine de la construction automobile [3][4][5]. Certaines d'entre elles tentent de développer de nouveaux indicateurs afin de caractériser l'appréciation subjective du bruit [6] tandis que d'autres essayent de relier les facteurs de perception entre eux [8]. Cependant, toutes ces études présentent l'inconvénient de reposer principalement sur l'utilisation de prototypes.

Dans ce papier est étudié la possibilité d'utiliser les résultats d'un modèle numérique basé sur la méthode SEA [7] (Statistical Energy Analysis) développé chez Saint-Gobain afin de réaliser des études de psycho-acoustique.

Ce papier fait suite à l'article de conférence [9]. Un premier chapitre rappellera donc succinctement les points importants du fonctionnement du modèle SEA. Ensuite sera présentée la comparaison subjective réalisée avec jury entre des signaux audio issus de mesures sur véhicule et des signaux audio issus des résultats du modèle SEA. À la suite des conclusions apportées par ces essais, il a été décidé d'étudier l'impact des joints de vitrages sur le coefficient de perte par transmission (abrégié TL pour Transmission Loss en anglais dans la suite de ce texte). Dans un dernier temps, cette campagne d'essais est donc également présentée.

## 2 Rappel sur la modélisation SEA

Comme évoqué dans le précédent article [9], la méthode SEA a été choisie par Saint-Gobain car particulièrement adéquate, en comparaison avec d'autres méthodes plus classiques comme l'utilisation d'éléments finis ou d'éléments frontières, pour étudier le bruit d'origine aérien dans le domaine des hautes fréquences. Des différentes sources acoustiques auxquelles sont soumis les automobiles, le bruit aérien est en effet celle qui génère la majorité du bruit à hautes fréquences. Or, cela coïncide avec domaine fréquentiel dans lequel se situe la fréquence critique des vitrages<sup>1</sup> produits par Saint-Gobain (~3.5 kHz pour du verre trempé). Dans ce chapitre sont rappelées les caractéristiques principales du modèle.

La géométrie sur laquelle est basée la modélisation est celle de la voiture Renault Talisman. De cette géométrie ont été définis les sous-systèmes suivants entre lesquels une balance énergétique est réalisée par le modèle :

- Panneaux vitrages visibles figure 1 ;
- Panneaux carrosseries de la voiture visibles figure 1. Ces panneaux, de même que les vitrages, sont définis à l'aide d'un coefficient de perte par transmission ;
- Des volumes d'air représentant les cavités acoustiques à l'intérieur (cf. Figure 2) et à l'extérieur de la voiture. La cavité acoustique au cœur de notre étude est celle qui correspond à l'espace où se situe la tête du conducteur. Elle est entourée en rouge sur la figure 2.

Ces échanges énergétiques sont schématisés figure 3 où l'on peut noter que les panneaux vitrages et les panneaux carrosseries adjacents n'échangent pas d'énergie dans notre modèle actuel. Cette hypothèse sera discutée plus tard dans ce papier.

En sortie de ce modèle, il est possible d'obtenir la quantité d'énergie dans chaque cavité acoustique et ainsi de

1. Fréquence minimale à laquelle se produit le phénomène de coïncidence pour le vitrage. A cette fréquence, la longueur d'onde dans l'air et la longueur d'onde de flexion du vitrage correspondent. Cela provoque un abaissement local drastique de l'isolement acoustique du vitrage

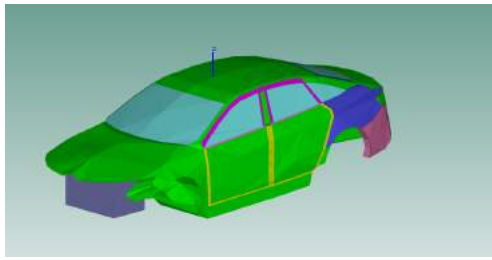


FIGURE 1 – Visualisation des panneaux vitrages et panneaux carrosseries présents dans le modèles SEA

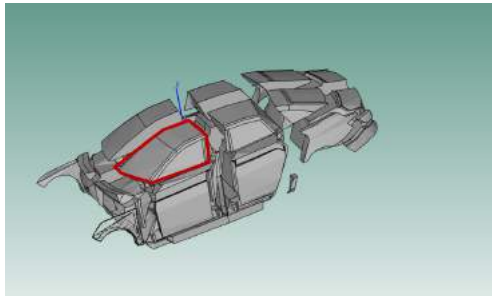


FIGURE 2 – Visualisation des cavités acoustiques intérieures présentes dans le modèle SEA

remonter à la pression acoustique à l'aide de l'équation 1.

$$\langle E \rangle = \langle p^2 \rangle \frac{V}{\rho c^2} \tag{1}$$

Avec :

- $\langle p^2 \rangle$  la pression quadratique moyenne dans la cavité acoustique ;
- V le volume de la cavité ;
- $\rho$  la densité
- c la vitesse du son dans l'air.

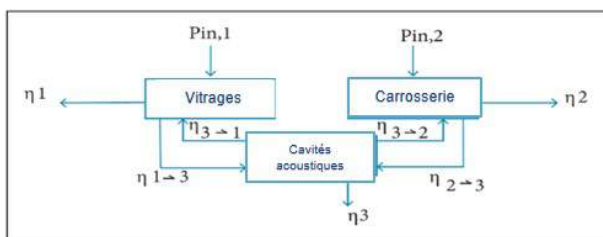


FIGURE 3 – Schématisation des échanges énergétiques dans le modèle SEA Saint-Gobain

### 3 Étude comparative par d'analyse subjective par un jury

#### 3.1 Génération des stimuli

Lors de la phase précédente de notre étude présentée dans l'article [9], des mesures de pression ont été réalisées au niveau de l'appui-tête conducteur sur un véhicule exposé à un champ diffus généré par une source de type "bruit blanc". Les mesures de pression ont été réalisées en bandes de tiers d'octave ainsi qu'en bandes fines. Le bruit transmis à l'intérieur de l'habitacle a été modifié manuellement à l'aide d'ajout de masques acoustiquement isolants directement apposés sur les vitrages. De même, les vitrages initiaux en verre trempé ont été remplacés par des verres laminés. Tout ceci a permis d'obtenir 19 "configurations véhicules" ayant des pressions acoustiques relativement différentes au niveau de l'appui-tête conducteur et donc de générer notre premier jeu de données. Dans la suite de cet article, il sera désigné, ainsi que les signaux qu'il a permis de produire, par le terme "mesuré".

Ces différentes configurations ont parallèlement été reproduites par simulation via le modèle SEA pour obtenir un jeu de pressions simulées en tiers d'octave. A noter également que le TL qui définit les échanges énergétiques au travers du vitrage dans le modèle SEA a d'une part, été calculé à l'aide d'un logiciel interne et a d'autre part, été déterminé à l'aide d'une mesure préconisée par le fournisseur du logiciel sur lequel est réalisé le modèle SEA. L'idée était ainsi d'étudier l'influence de ce paramètre dans le modèle. Dans la suite de cet article, ces jeux de données, ainsi que les signaux qu'ils ont permis de produire, seront désignés par le terme "simulés".

Les jeux de pressions "mesurés" et "simulés" ont par la suite été auralisés afin d'acquérir des banques de sons "mesurés" et "simulés". Les étapes de mesure, de simulation et d'auralisation sont détaillées dans l'article [9] et sont résumées dans le graphique figure 4.

Ces jeux ont permis de réaliser une étude de perception subjective auprès de jurys.

#### 3.2 Notation libre du désagrément des sons

L'objectif de cette expérimentation est d'étudier si les sons générés à partir des données produites par le modèle sont perçus de façon similaire aux sons basés sur les mesures. Pour ce faire, tous les sons recevront une note de désagrément par un jury. Ces scores seront par la suite traités statistiquement.

##### 3.2.1 Présentation des essais

L'approche a consisté à demander à 24 volontaires âgés de 20 à 30 ans, d'écouter les sons à l'aide d'un casque dans la salle de réécoute présente au Laboratoire de Vibration et d'Acoustique visible figure 5. Ces derniers devaient se représenter dans une voiture roulant à 130 km/h sur l'autoroute et évaluer le désagrément qu'ils ressentaient en écoutant les enregistrements. Pour leur réponse, les

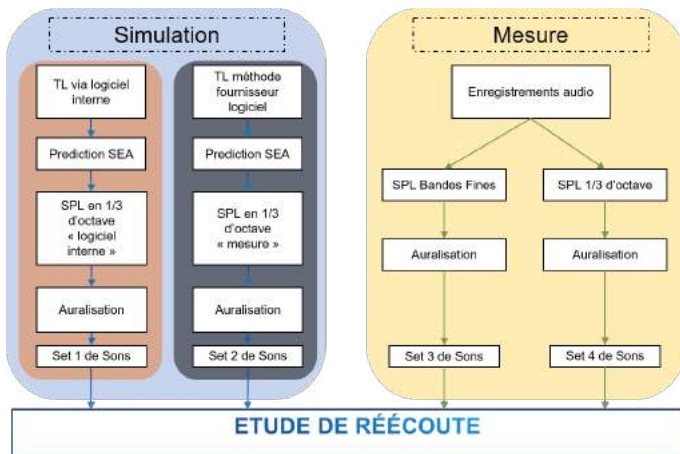


FIGURE 4 – Résumé du processus de génération des stimuli utilisés pour l'étude de perception subjective.



FIGURE 5 – Salle de réécoute du Laboratoire de Vibration et d'Acoustique

participants avaient à leur disposition une interface avec un curseur à déplacer sur une échelle allant de "pas du tout" pénible à "extrêmement" pénible (cf. Figure 6). Ces notations étaient ensuite converties en score allant de 0 à 1000 afin de permettre un post-traitement statistique. Les 4 sets de sons évoqués plus tôt étaient présentés l'un après l'autre. Afin d'éviter une influence de l'ordre de présentation des sets, ce dernier était modifié entre chaque participant. Le niveau de pression acoustique des sons joués dans le casque était calibré à un niveau réaliste mesuré par Saint-Gobain lors d'essais sur piste.

### 3.2.2 Résultats

Dans un premier temps, la représentation des moyennes des scores pour chaque "configuration véhicule" de chaque set de sons visible figure 7 permet de mettre en évidence une évolution similaire du jugement des sons quelque soit leur set d'origine. La méthode SEA semble donc permettre de produire des sons cohérents avec ceux provenant de mesures.

Dans un second temps, la table des scores d'appréciation

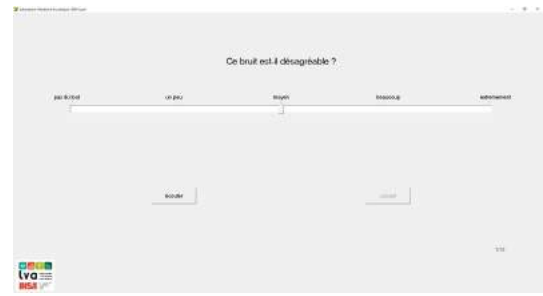


FIGURE 6 – Interface pour la notation libre

des sons donnés par les participants a permis de réaliser un traitement d'analyse de variance à deux facteurs (abrégé ANOVA pour ANalysis Of Variance en anglais dans la suite du texte). Les scores étaient la variable dépendante tandis que "l'origine des sons" et la "configuration véhicule" étaient les facteurs étudiés. Les résultats de l'ANOVA sont présentés dans la table 1. Dans cette table, une p-valeur supérieure à la valeur seuil de 5 % est considérée comme significative signifiant que l'influence du facteur étudié sur les moyennes de la variable dépendante est elle-même significative.

On peut ainsi déterminer que la configuration véhicule est un facteur très significatif ( $F = 57.99$  et  $p < 2e-16$ ). Cela confirme que les participants perçoivent bien les modifications de l'acoustique du véhicule que nous avons réalisées.

L'ANOVA a, par ailleurs, démontré que le facteur "origine des sons" en lui-même n'était pas un paramètre significatif ( $F=0.995$ ,  $p = 0.4$ ) mais qu'en revanche son interaction avec le facteur "configuration véhicule" est influente ( $F=2.039$ ,  $p < 0.001$ ). De ce fait, l'origine du son semble uniquement influencer le désagrément pour certaines configurations particulières du véhicule. En regardant la figure 7, on peut déterminer que les configurations concernées par ce phénomène sont celles pour lequel les vitrages sont réalisés avec du verre trempé.

Pour ces configurations, nous nous sommes intéressé plus précisément au niveau de pression dans la cavité tête du conducteur. Des comparaisons des spectres comme celle illustrée figure 8 ont été réalisées. Elles mettent en évidence une légère surestimation du niveau de pression à la fréquence critique du vitrage de la part de la méthode SEA. Les participants entendent ainsi plus fortement une composante haute fréquence ce qui peut les déranger davantage. Il est important de mentionner que tout ceci n'a pas lieu pour les configurations utilisant du verre laminé. Plusieurs hypothèses ont été avancées pour expliquer l'origine de cette surestimation de la part du modèle SEA.

Premièrement, il a été mentionné plus tôt dans ce papier que les vitrages n'échangeaient pas d'énergie avec les panneaux annexes. Par conséquent, aucune énergie ne peut se dissiper entre le vitrage et son environnement direct contrairement à une situation réelle. Cela expliquerait une surestimation du niveau de bruit dans la simulation.

La seconde hypothèse ayant fait l'objet d'une première série de test, est elle développée plus en détails dans la



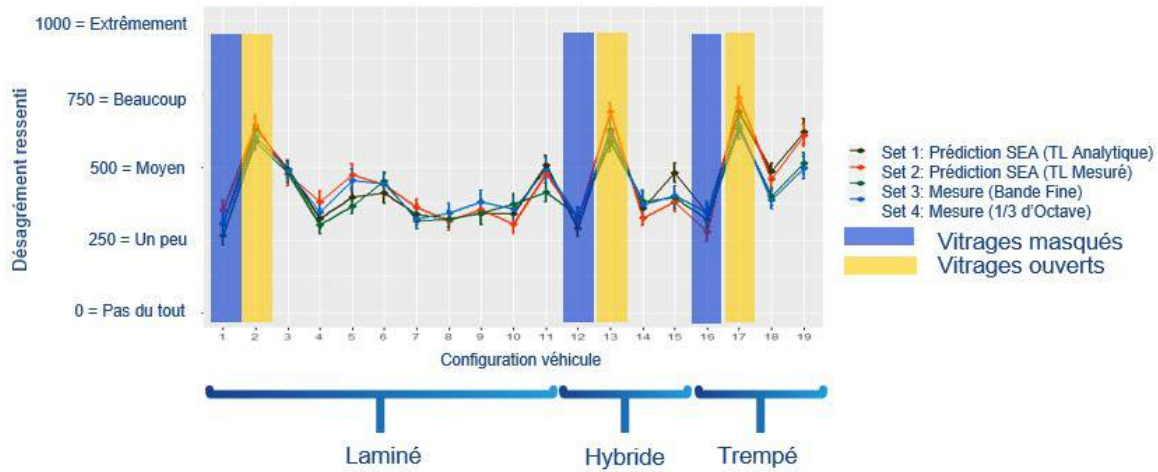


FIGURE 7 – Moyennes des scores donnés aux sons par les participants en fonction de leur set d’origine et de la configuration véhicule représentée.

TABLEAU 1 – Résultat de l’ANOVA à 2 facteurs

Source	Somme des carrées	Df	Moyenne des carrées	F-ratio	p-value
Set d’origine	288975	3	96325	3.688	0.4
Configuration véhicule	25285405	18	1404745	57.99	<2e-16 ***
Set d’origine * Configuration véhicule	1557320	54	28839	2.039	9.32e-6 ***

Signif. codes : 0 ‘\*\*\*’ 0.001 ‘\*\*’ 0.01 ‘\*’ 0.05 ‘.’ ‘ ’ 1

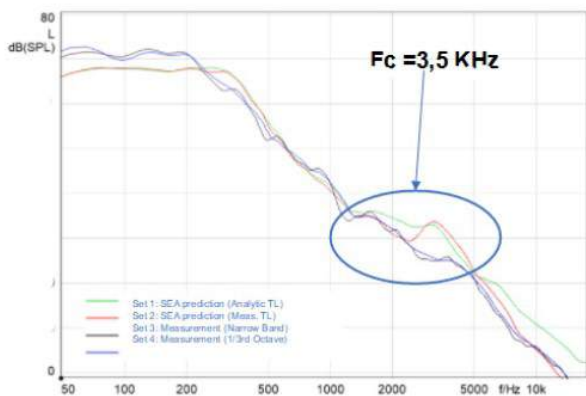


FIGURE 8 – Comparaison du niveau de pression moyen en dB au niveau de la cavité tête du conducteur pour la configuration véhicule 17 (tous les vitrages contribuent, tous les vitrages sont en verre trempé)

section ci-après.

#### 4 Influence du joint de vitrage sur l’indice de perte par transmission (TL)

Comme indiqué plus tôt dans ce document, la description des vitrages est réalisée par l’utilisation d’un indice de perte par transmission qui peut être évalué numériquement ou à l’aide d’une méthode préconisée par le fournisseur du logiciel. Néanmoins, on note déjà sur la figure 8 une différence entre les résultats du modèle utilisant le TL analytique (courbe verte) et le TL via la méthode préconisée par le fournisseur du logiciel (courbe rouge) ce qui met en évidence une influence même du choix du TL pour définir les vitrages. De plus, on sait que le TL à la fréquence critique d’une plaque est majoritairement influencé par l’amortissement structural du matériaux qui la compose (cf. Figure 9). Également, les joints de vitrage sont source dissipation [11]. De ce fait, ils pourraient être à l’origine de phénomènes de dissipation agissant sur les bords du vitrage influençant ainsi le TL caractérisant les capacités d’isolation acoustique dudit vitrage. L’ensemble "joint + vitrage" devenant plus dissipatif que le verre seul, alors la perte par transmission à la fréquence de coïncidence seraient en réalité plus important que ce qui est implémenté pour l’instant dans le modèle SEA. Les vitrages en verre laminé étant très dissipatifs par nature ; ils seraient beaucoup moins sensibles à ce phénomène Cela expliquerait que seuls les configurations utilisant du verre trempé soient concernées.

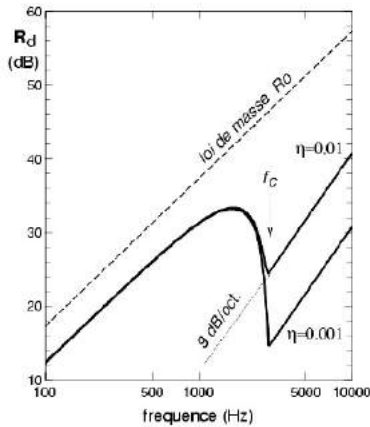


Figure 5.16 - Indice d'affaiblissement en champ diffus pour une paroi infinie et deux valeurs du facteur de perte (1% et 0,1%)



FIGURE 9 – Figure extraite de l'ouvrage de F.J.Fahy [10]



FIGURE 10 – Équerres permettant la fixation par compression du verre dans la paroi

### 4.1 Présentation de la campagne de mesure

Pour explorer cette voie de recherche, une campagne de mesures de TL a donc été réalisée au laboratoire de SGR Compiègne sur un prototype simplifié fixé entre deux salles réverbérantes comme montré sur la figure 11. Il s'agissait là d'un vitrage plat en verre trempé ou en verre laminé. Pour chaque type de verre, le TL a été mesuré une première fois avec les conditions limites du montage habituellement utilisé pour caractériser la transparence acoustique des vitrages. Dans ce montage, le verre est tenu par compression dans son emplacement dans le mur à l'aide d'équerres visibles figure 10 et figure 12 qui sont elles mêmes fixées dans le mur par des vis. Ces équerres peuvent néanmoins coulisser dans la paroi afin de s'assurer que le verre est le plus serré possible. L'étanchéité du montage a été assurée à l'aide d'une mousse rigide de faible épaisseur.

Dans un second temps, les conditions limites du verre ont été modifiées. Des découpes de joints de vitrages automobile, observables sur la figure 12, ont été intercalées entre le verre et les équerres afin de reproduire le plus fidèlement possible des conditions limites s'approchant au mieux des conditions de montage du vitrage dans un véhicule. Un schéma de ce montage est illustré figure 13. Afin d'éviter une influence de la pression imposée par les équerres sur les joints, leur position a été fixée à distance constante du verre via des bandes millimétrées fixées sur les équerres.

FIGURE 11 – Montage mis en place entre les deux salles réverbérantes

Les mesures de TL ont été réalisées conformément à la norme [12]. Il s'agit de mesurer le niveau pression de chaque côté de la paroi ainsi que le temps de réverbération dans la salle de réception. Le TL est alors estimé par application de l'équation 2 :

$$R = L_1 - L_2 + 10 \log\left(\frac{S}{A}\right) \tag{2}$$

Avec :

- R correspond au TL. Il est appelé "indice d'affaiblissement acoustique" dans la norme ;
- $L_1$  Niveau moyen de pression dans la salle d'émission ;
- $L_2$  Niveau moyen de pression dans la salle de réception ;
- S : l'aire de l'ouverture d'essai dans laquelle l'élément d'essai est installé ;
- A : l'aire d'absorption acoustique équivalente dans la salle de réception. Elle peut être déterminée grâce à la mesure du temps de réverbération et à l'application de la formule 3.

$$A = \frac{0.16V}{T} \tag{3}$$

Avec :

- T : le temps de réverbération dans la salle de réception ;
- V : le volume de la salle de réception.

Ces essais venant d'être réalisés et les conclusions restant encore à synthétiser, elles ne sont pas présentes dans cet article et mais elles seront exposées pendant la conférence.

## 5 Conclusion

Une première étude de comparaison de la perception subjective entre des sons générés depuis le modèle SEA et des sons produit à partir de mesures a été réalisée auprès



FIGURE 12 – Montage d'un verre trempé dans des découpes de joints de portière

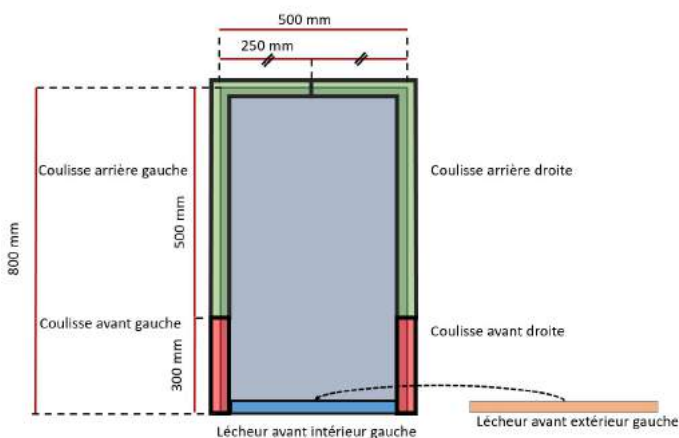


FIGURE 13 – Schéma du montage avec joint vitrage autour du verre plat

d'un jury. La robustesse de la méthodologie d'auralisation employée a pu être vérifiée. Le modèle permet l'auralisation de sons proches de ce que produit la mesure pour la majorité des configurations véhicules étudiées. Néanmoins, pour les configurations véhicules dont tous les vitrages sont composés de verre trempé, le niveau de bruit calculé est surestimé au voisinage de la fréquence critique. Cette surestimation semble être perçue par les participants. Plusieurs hypothèses ont été formulées quant à son origine. L'une d'entre elles a d'ores et déjà été testée dans les locaux de Saint-Gobain. Les résultats seront exposés lors de la présentation au congrès.

## Références

- [1] D. Västfjäll, M.-A. Gulbol, M. Kleiner, and T. Gärling, Affective evaluations of and reactions to exterior and interior vehicle auditory quality, *Journal of Sound and Vibration*, 255(3) :501–518, (2002)
- [2] F. Penne, M. de Munck, and P. Sas, Shaping the sound of the next-generation BMW, *International conference on noise and vibration engineering*, pages 25–39, Leuven (2004)
- [3] E. Zwicker and H. Fastl, Psychoacoustics - Facts and Models, Springer, Berlin (2006)
- [4] Y. S. Wang, G. Q. Shen, H. Guo, X. L. Tang, and T. Hamade, Roughness modelling based on human auditory perception for sound quality evaluation of vehicle interior noise, *Journal of Sound and Vibration*, 332(16) :3893–3904 (2013)
- [5] S. Lee. Objective evaluation of interior sound quality in passenger cars during acceleration, *Journal of Sound and Vibration* 310 :149–168, (2008)
- [6] M. J. Nor, M. H. Fouladi, H. Nahvi, and A. K. Ariffin. Index for vehicle acoustical comfort inside a passenger car, *Applied Acoustics*, 69(4) :343–353, (2008)
- [7] R. H. Lyon, R. G. DeJong, M. Heckl, Theory and application of statistical energy analysis, 3021-3021, (1995)
- [8] R. Bisping. Car interior sound quality : experimental analysis by synthesis, (*Applied Acoustics*), 69(4) :343–353, (2008)
- [9] V. Miqueau, E. Parizet, S. Germes, Assessment of the psychoacoustic automotive comfort using Statistical Energy Analysis models, *Internoise2021* (2021).
- [10] F.J. Fahy, Sound and Structural Vibration, *Academic Press*
- [11] C. Oliver Serna, Vibroacoustic analysis of car door and window seals, *PhD thesis*, (2016)
- [12] NF-EN ISO, 10140, (2016).