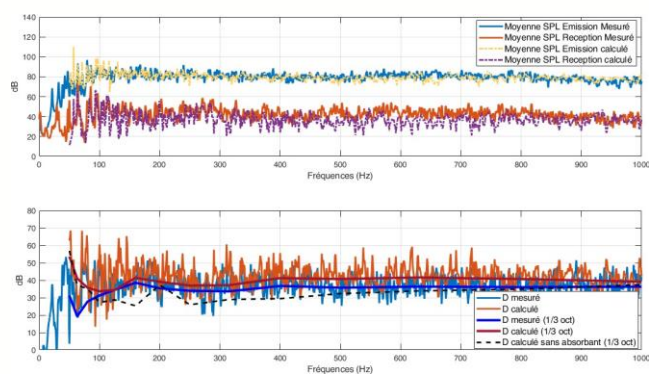
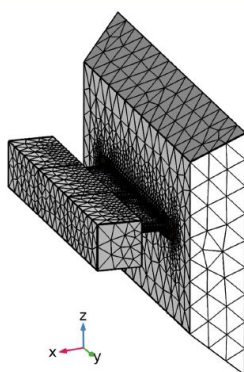
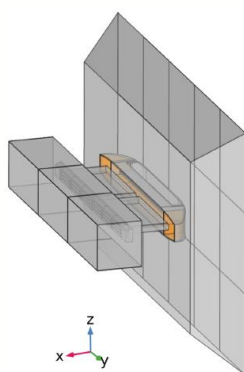


ÉTUDE ET MODELISATION NUMERIQUE DE LA TRANSMISSION ACOUSTIQUE DES ENTREES D'AIR DE FENETRE

MENUISERIES EXTERIEURES



Crédits photos : Thèse J. Puig

Réalisation :

le cnam
Imssc

Financé par :

CODIFAB
Développement des Industries Françaises
de l'Ameublement et du Bois

REALISATION



Le laboratoire de mécanique des structures et des systèmes couplés (Lmssc) est une unité de recherche du Conservatoire national des arts et métiers. Les travaux qui y sont menés concernent le développement de modèles robustes pour la prévision et la réduction des réponses dynamiques de systèmes couplés à l'aide de traitements adaptatifs. Les résultats de ces recherches s'adressent principalement au monde académique, aux centres de recherche et aux services R & D des industries de pointe. Ces activités ont également des retombées sur les enseignements réalisés au sein des différents cursus d'ingénieur du Cnam en mécanique. L'équipe collabore de façon privilégiée avec le milieu aéronautique et spatial, via des contrats de recherche et des bourses de thèses. Le LMSSC participe également à divers projets européens et internationaux. Pour en savoir plus : www.lmssc.cnam.fr

FINANCEMENT



Le CODIFAB, Comité Professionnel de Développement des Industries Françaises de l'Ameublement et du Bois, a pour mission de conduire et financer, par le produit de la Taxe Affectée, des actions d'intérêt général en faveur des fabricants français de l'ameublement (meubles et aménagements) et du bois (menuiseries, charpentes, panneaux, bois lamellé, CLT, ossature bois, ...). Le CODIFAB fédère et rassemble 4200 PME/ETI et plus de 10000 artisans, représentés par leurs organisations professionnelles:



Les actions collectives ont pour objectif d'accompagner les entreprises de création, de production et de commercialisation par : une meilleure diffusion de l'innovation et des nouvelles technologies, l'adaptation aux besoins du marché et aux normes environnementales, la promotion, le développement international, la formation, et par toute étude ou initiative présentant un intérêt pour l'ensemble de la profession. Pour en savoir plus : www.codifab.fr

L'entrée d'air apparaît comme un chemin privilégié pour la transmission de l'énergie acoustique, de l'extérieur vers l'intérieur des bâtis. En effet, la mise en place d'entrées d'air dégrade l'étanchéité acoustique des fenêtres, et accroît l'exposition aux bruits extérieurs et à ses conséquences néfastes pour la santé. La mesure des performances acoustiques de ce type d'éléments est régie par des normes permettant a priori de garantir un certain niveau de précision. Néanmoins, la détermination de l'indice d'affaiblissement acoustique normalisé $D_{n,e}$ en laboratoire est coûteuse et présente des défauts de reproductibilité, particulièrement à basse fréquence. Plusieurs études montrent en effet que les indicateurs acoustiques mesurés sont sensibles au montage de l'échantillon et aux particularités des chambres acoustiques utilisées pour les essais.

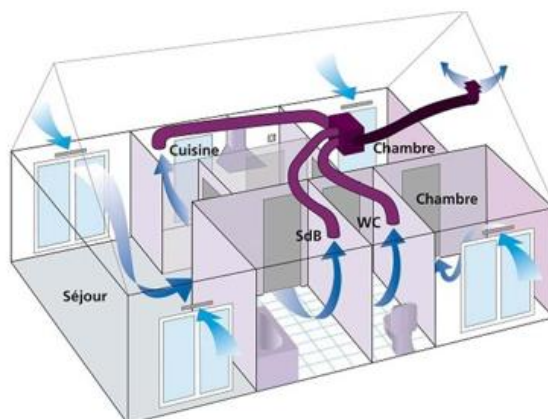


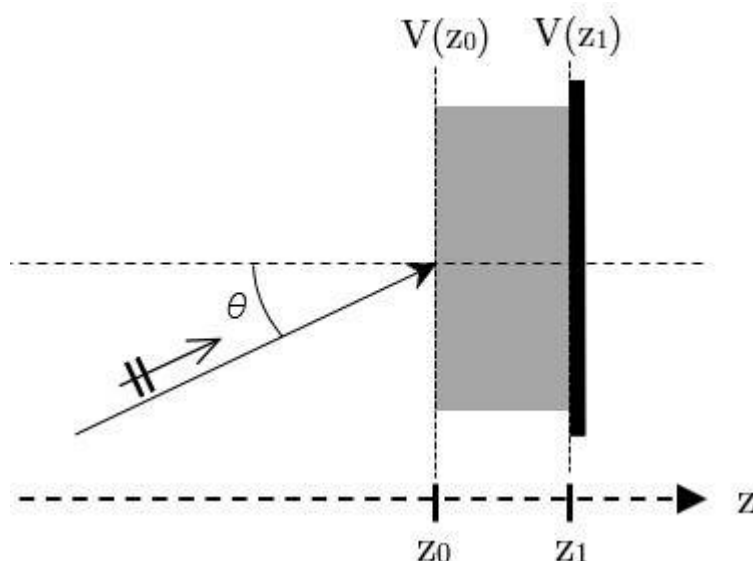
FIGURE 1.3 – Schéma de principe d'une VMC simple flux [34].

La simulation numérique constitue de fait une alternative intéressante aux essais expérimentaux ; elle permet d'obtenir des résultats rapides à bas coûts et d'étudier l'influence de nombreux paramètres, sans nécessiter la fabrication systématique d'un nouvel échantillon. Il n'existe à ce jour aucun outil numérique permettant de prédire de façon fiable l'isolement acoustique d'une entrée d'air. Ainsi, l'actuel projet de recherche est guidé par **deux objectifs principaux** : le **développement d'un modèle numérique permettant de prédire l'isolation acoustique des entrées d'air** et le **développement de stratégies efficaces de réduction du bruit extérieur**, à l'aide du modèle développé, en tenant compte des contraintes industrielles.

Un des nombreux intérêts de la simulation numérique est en effet de pouvoir réaliser des analyses paramétriques afin d'optimiser les caractéristiques des mousses acoustiques et des matériaux utilisés, en plus de la géométrie des entrées d'air. Ces procédures d'optimisation doivent prendre en compte les contraintes industrielles liées à ces systèmes d'aération (débit d'air frais, implantation sur les fenêtres, encombrement, . . .). La fiabilité du modèle développé repose sur une compréhension fine des phénomènes

physiques à l'œuvre dans la géométrie interne de l'entrée d'air, ainsi que dans les salles d'essais qui l'entourent. Les mousses acoustiques ont d'ailleurs un rôle particulièrement important dans l'atténuation de l'énergie sonore, ce qui rend indispensable leur prise en compte dans la modélisation numérique.

Les travaux de recherche présentés s'intéressent principalement au domaine des basses fréquences. Le premier modèle développé s'appuie sur la méthode des éléments finis (FEM) pour ce qui concerne la simulation du comportement acoustique intrinsèque de l'entrée d'air sur la plage 50-5000 Hz. Nous montrerons qu'il est nécessaire de prendre les salles d'émission et de réception en compte afin d'assurer une meilleure corrélation entre les résultats et les essais. Pour ce faire, une méthode de décomposition de domaines appelée PTF sera mise en œuvre. La synthèse modale et la FEM seront utilisées pour calculer les fonctions de transfert. Une technique d'accélération de la convergence sera étudiée, afin de permettre l'étude du système complet dans la plage de fréquence 50-1000 Hz. Une comparaison des résultats du modèle avec des résultats d'essais en laboratoire sera ensuite présentée. Des améliorations du modèle permettant une modélisation plus fine du laboratoire clôtureront cette recherche.



Problème acoustique étudié par TMM (Transfer Matrix Method). En noir : mur rigide. En gris : couche fluide ou poreuse

L'enjeu principal de ce travail de recherche résidait dans l'élaboration d'un modèle numérique performant d'entrée d'air de fenêtre. Plus précisément, notre objectif était de prédire par le calcul l'isolement acoustique normalisé ($D_{n,e}$) d'une entrée d'air, à partir de sa géométrie et des matériaux qui la composent. Cette recherche s'inscrit dans la lutte contre les nuisances sonores qui nous affectent au quotidien, dans notre habitat, dans les transports ou au travail. La réduction de ces nuisances est devenue un enjeu

majeur, tant du point de vue sanitaire que de celui du confort, ce qui implique inévitablement d'améliorer l'isolation acoustique des bâtiments. Or les entrées d'air de fenêtres, tout en étant essentielles pour la ventilation des espaces intérieurs, sont la principale faiblesse d'une façade quant à son imperméabilité au bruit extérieur. Leur pose offre en effet un chemin privilégié pour la transmission du son. Dès lors, la question clé à l'origine du travail réalisé est la suivante : comment garantir une isolation acoustique suffisante tout en assurant un débit d'air neuf optimal ? Si les essais empiriques industriels ont jusqu'à présent permis certaines améliorations dans les performances acoustiques, les mesures en laboratoire demeurent longues et coûteuses, en plus d'être sujettes à de nombreuses sources d'incertitude. C'est pourquoi la réponse à cette problématique passe notamment par la modélisation numérique ; c'est sur cette modélisation que les efforts se sont concentrés tout au long de ces travaux de thèse.

Le comportement intrinsèque d'une entrée d'air a été exploré, en développant un modèle basé sur la méthode des éléments finis. Cette approche a permis d'obtenir l'indice d'affaiblissement R de plusieurs géométries complexes d'entrée d'air sur une plage de fréquence allant de 50 à 5 000 Hz, et de classer de manière pertinente les performances acoustiques obtenues à partir de différentes configurations géométriques. Néanmoins, cette démarche ne permet pas la prédiction du $D_{n,e}$ habituellement mesuré en laboratoire. Cette première approche met en lumière l'importance que revêt l'intégration des salles d'essais dans la modélisation numérique, pour une évaluation plus précise de l'isolement acoustique des entrées d'air.

La taille importante des salles rendant impossible leur modélisation par la méthode des éléments finis, le choix s'est porté sur l'utilisation d'une méthode de décomposition de domaines appelée Patch Transfer Function (PTF). Cette approche permet d'accélérer les temps de calcul du fait de la réduction considérable du nombre de modes nécessaires à la convergence des sous-systèmes analytiques, et améliore la précision des résultats dans l'ensemble des scénarios étudiés.

La complexité inhérente à la géométrie du laboratoire et à son découpage en sous-systèmes PTF a motivé le développement d'un programme dédié spécifiquement au calcul de la pression acoustique avec la méthode PTF. Ce programme représente une des contributions majeures de ce travail de recherche. Il automatise aujourd'hui les principales étapes de la méthode, notamment la définition des interfaces et des patches, le calcul des fonctions de transfert et des corrections quasi-statiques pour chaque sous-système, la résolution des équations de la PTF pour chaque fréquence, l'import et la sauvegarde des matrices, le post-traitement des résultats. Ce programme a été validé sur un modèle réduit d'un laboratoire d'essais avant d'être appliqué au calcul de la pression acoustique en plusieurs points d'écoute dans un laboratoire réel. Des mesures expérimentales ont été réalisées dans ce laboratoire afin de mesurer des fonctions de transfert entre plusieurs points d'écoute, en fonction de l'entrée d'air utilisée. Ces essais ont ensuite été simulés à l'aide du programme développé, afin de comparer les résultats. Il en ressort que les fonctions de transfert prédites par le modèle sur la plage de fréquences allant de 50 à 1 000 Hz concordent avec celles mesurées, atteignant ainsi l'un des objectifs clés de cette recherche. Toutefois, il a été constaté un manque d'amortissement dans les réponses du modèle qui se traduit par des pics de résonances et d'antirésonances particulièrement marqués dans les niveaux de pression calculés.

Afin d'améliorer la fidélité du modèle et d'y introduire de la dissipation, il est proposé de prendre en compte les panneaux absorbants présents sur les parois des salles d'essais. Le modèle complet a ensuite été appliqué au laboratoire réel. Les résultats obtenus montrent d'une part que l'intégration des panneaux absorbants apporte l'amortissement souhaité au modèle et améliore les réponses en fréquences calculées. Les panneaux absorbants permettent d'autre part le calcul du temps de réverbération dans la salle de réception avec la formule de Sabine. Il devient alors possible de calculer un $D_{n,e}$ entièrement numérique, ce qui constituait un des objectifs de ce travail de recherche. Les résultats du modèle sont corrects, néanmoins les temps de calcul pour le laboratoire complet demeurent excessivement longs et coûteux en mémoire, c'est pourquoi plusieurs pistes d'amélioration sont suggérées.

Ce travail de recherche ouvre la voie à de nombreuses perspectives. Si le modèle développé forme à ce jour une preuve de concept convaincante, plusieurs axes d'amélioration se dessinent.

- **La réduction du temps de calcul et des coûts en mémoire** semble être la principale priorité. Le découpage actuel en sous-systèmes PTF génère un nombre conséquent de patchs pour le sous-système de la salle d'émission. Les matrices PTF étant pleines, cela engendre des données volumineuses dépassant les 50 Go. Des simplifications au niveau des interfaces de ce sous-système pourraient être explorées pour réduire le nombre de patchs et donc améliorer les performances du modèle. Une des approches pourrait être de négliger les sous-systèmes entourant l'auvent de l'entrée d'air.
- **Nouveau découpage du sous-système CAO** : Un découpage plus fin du sous-système contenant l'entrée d'air permettrait de réduire la taille des matrices éléments finis et donc la durée de résolution. De plus, il deviendrait possible d'évaluer à moindre coût diverses combinaisons de géométries de part et d'autre des mortaises pratiquées dans la fenêtre, ce qui serait pertinent d'un point de vue industriel pour accélérer les processus d'optimisation.
- **Expérimentation du programme dans d'autres laboratoires** : Au cours de cette thèse, la modélisation s'est appuyée sur un laboratoire d'essai unique. Tester le programme développé sur un panel de laboratoires d'essais permettrait d'analyser les écarts éventuels dans les résultats. De nombreuses études démontrent que les mesures d'isolement acoustique présentent des défauts de reproductibilité et de répétabilité, les écarts inter-laboratoires sont régulièrement mis en avant. Le modèle permettrait de constituer une base de données de différentes salles pour analyser leur influence sur les valeurs prédites d'isolement acoustique. Ces nouveaux essais nécessiteront des ajustements, notamment au niveau de la composition des panneaux absorbants. Par ailleurs, le laboratoire utilisé dans le cadre de cette recherche est équipé d'imposants diffuseurs – actuellement non pris en compte dans le modèle – qui modifient les réponses fréquentielles des salles. S'il semble délicat de modéliser ces derniers, ceux-ci étant à l'intérieur des sous-systèmes analytiques, des facteurs correctifs pourraient sans doute être définis afin d'améliorer la précision du modèle.
- **Optimisation des géométries** : De nombreux problèmes liés à la géométrie du sous-système CAO ont perturbé l'avancement des travaux. Actuellement, les géométries sont conçues sous Solidworks avant d'être importées en format STL dans Comsol en vue de la génération du maillage et du calcul des matrices éléments finis, finalement exploitées dans Matlab. Des alternatives permettant de minimiser le risque d'erreur lors de la reconstruction de la géométrie sous Comsol peuvent

certainement être envisagées.

- **Interface utilisateur** : Si l'intégration du programme dans un processus de conception industrielle était envisagée, la création d'une interface utilisateur conviviale serait indispensable pour simplifier son utilisation et réduire le risque d'erreurs lors de la saisie des données nécessaires au paramétrage des calculs.
- **Prise en compte des incertitudes** : La méthode PTF pourrait aisément s'adapter à l'introduction d'une part d'aléatoire dans les paramètres géométriques et matériaux de l'étude. L'analyse de sensibilité de différents paramètres serait une suite logique à ce travail de recherche, et permettrait l'utilisation du programme pour l'optimisation des entrées d'air.

Ces axes d'améliorations permettront sans nul doute d'améliorer la performance et l'applicabilité du modèle tout en élargissant son potentiel à divers domaines de l'acoustique du bâtiment. Il pourrait à terme devenir un outil clé dans la conception, à l'échelle industrielle, d'entrées d'air plus performantes d'un point de vue acoustique. La qualité de vie d'une large partie de la population fortement touchée par les nuisances sonores s'en trouverait alors sensiblement améliorée. Ce potentiel souligne l'importance continue de la recherche dans ce domaine et de son impact sur notre quotidien.

■ Accès aux résultats complets de cette étude :

www.codifab.fr