

CFA/VISHNO 2016

Développement d'outils logiciels pour la simulation aéro-vibro-acoustique

J.-P. Coyette, B. Van Den Nieuwenhof, Y. Detandt, G. Lielens, D.
D'Udekem et J.-L. Migeot

Free Field Technologies, MSC Software, Rue Emile Francqui, 9, B1435 Mont Saint
Guibert, Belgique
jean-pierre.coyette@fft.be



LE MANS

Le développement des méthodes numériques et des outils logiciels a révolutionné, ces dernières décennies, le traitement de multiples problèmes vibro- et aéro-acoustiques. Les principales avancées observées résultent de la mise en oeuvre de méthodes de domaine (éléments finis continus ou discontinus) qui offrent la robustesse, la généralité et la performance qu'exige le traitement de problèmes industriels. Dans ce contexte, les éléments infinis et les méthodes PML permettent de gérer efficacement le rayonnement en milieu non-borné, en présence ou non d'un écoulement porteur. La prise en compte des multiples mécanismes d'amortissement (effets visco-thermiques associés aux micro-cavités ou aux lames d'air, matériaux poreux) alimente utilement la simulation vibro-acoustique. Celle-ci requiert également des méthodes appropriées de traitement combinant approches physiques et modales (discrètes ou analytiques). La mise en oeuvre de telles méthodes repose aussi sur une intégration toujours plus forte des solveurs et des maillages. Enfin, les grands nombres d'onde et les plus hautes fréquences nécessitent des approches adaptées : éléments finis discontinus (DGM) dans un cadre acoustique et approches non-paramétriques pour la gestion des incertitudes vibro-acoustiques. Les conditions de chargement sont également examinées. Une attention particulière est accordée au traitement d'excitations aléatoires à caractère distribué (champ diffus, couche limite turbulente). Le traitement conventionnel des matrices inter-spectrales, l'échantillonnage de telles excitations et les formulations asymptotiques sont plus particulièrement abordés. Le chargement aéro-acoustique est également analysé au travers de l'extraction des sources de simulations CFD via les analogies acoustiques.

1 Introduction

Le développement des méthodes numériques et des outils logiciels a révolutionné, ces dernières décennies, le traitement de multiples problèmes vibro- et aéro-acoustiques. La présente contribution vise à décrire succinctement les méthodes privilégiées à l'heure actuelle et à illustrer leur usage et leurs performances (précision, coût) au moyen d'exemples industriels. Une attention particulière est accordée aux opérateurs de propagation et à la gestion des conditions d'excitation. Après un rappel des aspects physiques plus particulièrement traités (propagation acoustique convectée, prise en compte des effets visco-thermiques associés aux minces lames d'air et aux micro-cavités, traitement de matériaux poreux dans un contexte vibro-acoustique), des approches discrètes essentiellement basées sur des méthodes de domaine sont décrites. Le traitement de problèmes extérieurs est abordé au moyen de méthodes adaptées (éléments infinis et PML). Les approches physiques et/ou modales supportant l'évaluation de la réponse sont comparées. Enfin la problématique des courtes longueurs d'onde et le traitement des incertitudes (associées à la modélisation et aux données d'un problème) sont adressés.

2 Aspects physiques

2.1 Propagation acoustique convectée

La propagation acoustique en présence d'un écoulement moyen homentropique et irrotationnel en milieu non borné est gouvernée par l'équation d'onde convectée :

$$\frac{D_0}{Dt} \left(\frac{\rho_0}{c_0^2} \frac{D_0 \phi}{Dt} \right) - \nabla \cdot (\rho_0 \nabla \phi) = 0, \quad (1)$$

où ϕ , c_0 , ρ_0 et \mathbf{v}_0 désignent respectivement le potentiel de vitesse acoustique, la vitesse locale du son, la densité locale et la vitesse de l'écoulement moyen. L'opérateur D_0/Dt est défini comme suit :

$$\frac{D_0}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{v}_0 \cdot \nabla. \quad (2)$$

Le terme $\mathbf{v}_0 \cdot \nabla$ est responsable du caractère non symétrique de la propagation, la longueur d'onde acoustique étant réduite

lorsque la propagation s'opère dans la direction opposée à l'écoulement et augmentée dans le cas contraire.

Le problème est traité dans le domaine des fréquences en supposant une dépendance harmonique des variables mises en jeu :

$$g(\mathbf{x}, t) = \text{Re} \left(\tilde{g}(\mathbf{x}, \omega) e^{i\omega t} \right), \quad (3)$$

où $\omega = 2\pi f$ est la fréquence circulaire. La pression acoustique \tilde{p} peut être exprimée en fonction de $\tilde{\phi}$ via la relation :

$$\tilde{p} = -\rho_0 \left(i\omega \tilde{\phi} + \mathbf{v}_0 \cdot \nabla \tilde{\phi} \right). \quad (4)$$

En l'absence d'un écoulement moyen, l'équation ci-dessus se réduit à l'équation de Helmholtz :

$$\Delta \tilde{p} + k^2 \tilde{p} = 0, \quad (5)$$

où $k = \omega/c$ est le nombre d'onde et c la vitesse du son.

L'équation décrivant la propagation acoustique est complétée de conditions frontières appropriées :

- La condition de rayonnement de Sommerfeld (rayonnement en champ libre) :

$$r \left(\frac{\partial \tilde{p}}{\partial r} + ik \tilde{p} \right) \rightarrow 0 \text{ as } r \rightarrow \infty \quad (6)$$

- La condition de Neumann le long d'une surface vibrante :

$$\frac{\partial \tilde{p}}{\partial n} = \alpha, \quad (7)$$

où n est la normale sortante et α est la valeur prescrite du gradient normal de pression (tel qu'induit par une accélération normale, par exemple).

Les Eq. (1) et (5) peuvent être résolues dans le domaine Ω en utilisant une méthode d'éléments finis (FEM) ou une méthode d'éléments frontières (BEM). Le traitement de la condition de Sommerfeld dans le contexte d'une méthode d'éléments finis requiert une stratégie particulière fondée sur l'usage d'une méthode d'éléments infinis (IE) ou d'une méthode PML (Perfectly Matched Layer), une alternative étant constituée par le couplage d'une méthode FEM et d'une méthode BEM.

2.2 Effets visco-thermiques

La tendance à la miniaturisation pose de nouveaux challenges en termes de modélisation acoustique dans des systèmes de petite taille (transducteurs électro-acoustiques, appareils auditifs). Ces applications ont justifié, ces vingt dernières années, un intérêt marqué pour l'étude des mécanismes d'amortissement associés aux fluides visco-thermiques. Dans un domaine borné (incluant ou non un couplage avec une structure vibrante), de tels phénomènes de dissipation sont localisés au voisinage des frontières rigides. Des mouvements entropiques (associés à une diffusion d'énergie) et tourbillonnaires (associés à une diffusion de la quantité de mouvement) se développent au voisinage des parois et interagissent avec la propagation acoustique. Ces interactions particulières sont à l'origine d'une extraction d'énergie des ondes acoustiques conduisant à une réduction de la vitesse de propagation et à une augmentation de l'amortissement. Les ondes thermiques (mouvements entropiques) et les ondes de cisaillement (mouvements tourbillonnaires) se diffusent dans le milieu selon la direction normale à la frontière et s'atténuent fortement sur les courtes distances associées aux épaisseurs de la couche limite δ_h et δ_v . Dans l'air et aux fréquences audibles, ces épaisseurs δ_h et δ_v ont pour ordre de grandeur des valeurs comprises entre 0.1 et 1 mm. Ces valeurs justifient la non-considération des dissipations visco-thermiques dans les formulations acoustiques isentropiques classiques. A un autre extrême, lorsque les dimensions caractéristiques du domaine sont beaucoup plus petites que la couche limite, l'usage d'un modèle d'écoulement de Stokes (isotherme ou compressible) est possible. Le modèle de propagation visco-thermique décrit un comportement fluide compris entre ces deux limites et permet d'adresser de nouvelles classes de problèmes physiques.

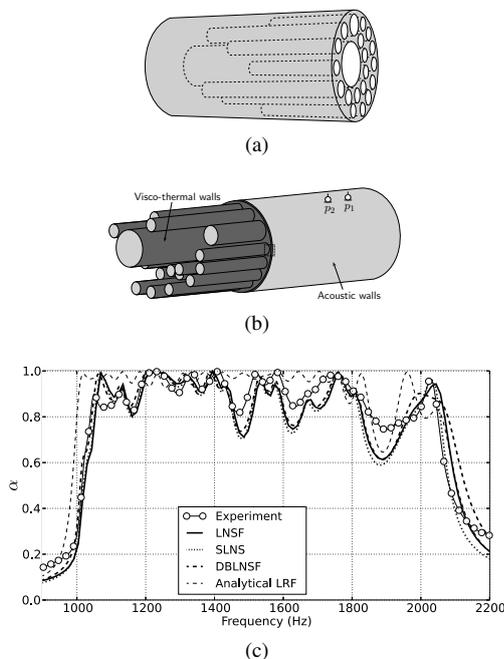


FIGURE 1 – (a) Schéma du résonateur large bande de Hannink, (b) simulation numérique du tube d'impédance et (c) évaluation du coefficient d'absorption (comparaison des résultats numériques obtenus au moyen de divers modèles avec les mesures)

Le traitement des effets visco-thermiques dans un contexte tridimensionnel arbitraire nécessite un examen particulier des équations de Navier-Stokes-Fourier (équations LNSF). De multiples schémas de solutions sont envisageables. Joly a ainsi développé une formulation linéaire de l'acoustique visco-thermique pour des fluides au repos en sélectionnant comme variables la vitesse particulaire et la température. Kampinga a présenté une formulation faible supportant un modèle d'éléments finis bien adapté à la gestion des effets visco-thermiques. Pour réduire le nombre de degrés de liberté mis en jeu dans le système algébrique, des techniques de réduction sont souhaitables. Elles permettent de maintenir une précision suffisante tout en conduisant à des temps de calcul plus attractifs. De multiples stratégies de réduction ont été proposées par différents auteurs (Beltman, Nijhof, Kampinga) pour modéliser les effets visqueux et thermiques associés aux couches limites. Tijdeman a ainsi proposé le premier modèle LRF (Low Reduced Frequency) bien adapté à la propagation dans les guides d'onde (tubes capillaires, couches minces). Une extension du modèle LRF capable de gérer un écoulement moyen de régime a été récemment proposée par Sambuc [1, 2].

De manière alternative, Bossart a décrit une procédure itérative pour la modélisation de fluides dissipatifs. La procédure consiste à décrire la physique associée à la couche limite par une admittance équivalente. Kampinga a présenté une méthode SLNS (Sequential Linearized Navier-Stokes). Celle-ci requiert, la résolution séquentielle de trois équations d'ondes scalaires associées respectivement aux variables de vitesse tangentielle, température et pression acoustique. Plus récemment, une approche hybride inspirée des travaux de Bossart et de Kampinga a été proposée par Sambuc [3] sous le nom DBLNSF (Distance Based Linearized Navier-Stokes-Fourier). De manière similaire au modèle de Bossart, les solutions visqueuse et thermique sont approximées en utilisant un modèle semi-analytique basé sur un champ distance à la paroi. Un pré-traitement doit être réalisé de manière à calculer efficacement ce champ distance à la paroi via la résolution d'une équation de Poisson. Les effets de dissipation sont ensuite intégrés aux champs spatiaux de densité et de module de compressibilité qui alimentent un opérateur de Helmholtz équivalent. Le principal avantage de cette technique par rapport à l'approche de Kampinga réside dans le fait qu'une seule équation d'onde (plutôt que trois) doit être résolue à chaque fréquence. Afin d'illustrer la capacité de modélisation visco-thermique, plusieurs modèles d'éléments finis visco-thermiques sont comparés pour une application relative à un système de résonateur large bande (également appelé *multiple resonator system*). Ce système a été conçu par Hannink afin de garantir une absorption acoustique efficace à l'intérieur de cabines d'avions. Le système est constitué d'un ensemble de résonateurs fermés de différentes longueurs, couplés les uns aux autres (Figure 1). Le coefficient d'absorption a été mesuré (tube d'impédance) et comparé aux résultats numériques. La figure 1 illustre les résultats obtenus pour l'absorption. Elle montre que le modèle DBLNSF se compare très bien aux modèles LNSF et SLNS comme aux mesures. Par contre, le modèle analytique mettant en jeu le modèle LRF avec une correction de longueur se révèle mal adapté à la prise en compte des effets visco-thermiques. En particulier, les effets d'interaction entre résonateurs adjacents ne sont pas pris en

compte.

2.3 Matériaux poreux

Les performances acoustiques de nombreux véhicules sont fortement tributaires de traitements acoustiques sans cesse plus performants. Les matériaux poreux jouent un rôle particulier dans ce contexte. Les performances obtenues résultent essentiellement des particularités offertes par les structures multi-couches à composants visco-élastiques (incluant ou non des matériaux poreux) en termes d'absorption acoustique, d'amortissement vibratoire et d'isolation acoustique. La conception optimale de traitements multi-couches requiert des modèles appropriés. Dans les cas les plus simples, la description cinématique de tels systèmes autorise une réduction préliminaire conduisant à l'identification de caractéristiques mécaniques équivalentes. Les systèmes plus complexes mettant en oeuvre des composants poreux flexibles nécessitent la mise en oeuvre de modèles plus sophistiqués. Une large gamme de techniques et de modèles est à présent disponible dans la littérature en vue de modéliser les matériaux poreux et d'homogénéiser des structures complexes. Les modèles d'impédance localisée et de fluide équivalent exploitent des hypothèses simplificatrices et se révèlent particulièrement utiles en de nombreuses circonstances. Les modèles basés sur la théorie de Biot permettent un traitement plus précis des interactions entre phases solide et fluide.

Le modèle de Biot pour les matériaux poreux est décrit et utilisé de manière extensive dans la littérature. Les premières implémentations du modèle de Biot ont exploité un formalisme en déplacement (déplacements du squelette et du fluide ou déplacement du squelette et déplacement relatif du fluide pondéré par la porosité). Ces formulations en déplacement conduisent toutefois à un très grand nombre de degrés de liberté (6 composantes par noeud dans un contexte 3-D) et ne facilitent pas le couplage d'un matériau poreux avec un domaine acoustique pour une étude en transmission. Le développement de formulations pression-déplacement (ou potentiel-déplacement) autorise une réduction significative du nombre de degrés de liberté (4 au lieu de 6) tout en facilitant le couplage avec d'autres matériaux.

Dans le contexte de la simulation acoustique, les implémentations disponibles pour le modèle de Biot se réfèrent majoritairement à des matériaux poreux isotropes. Les modèles associés bénéficient de l'approche micro-macro autorisant la prise en compte de l'effet de la micro-structure du matériau sur ses caractéristiques macro (évaluation du module de compressibilité du fluide sur base des longueurs caractéristiques visqueuse et thermique). La gestion des effets d'anisotropie (par exemple la résistance anisotrope au passage de l'air telle qu'induite par le procédé de fabrication) constitue une extension plus récente de ces modèles.

3 Méthodes numériques

3.1 Infinite elements

La méthode des éléments infinis (IE) s'est imposée ces vingt dernières années comme une méthode de choix pour le traitement de problèmes acoustiques extérieurs. Cette méthode ne met pas en oeuvre une couche absorbante mais

utilise une interpolation d'ordre élevé selon la direction radiale ainsi qu'une technique de mapping particulière pour représenter correctement le champ acoustique à l'infini. Le cadre mathématique [4] garantissant la convergence de la méthode est constitué par le théorème de Wilcox-Atkinson.

Le modèle discret est basé sur une méthode hybride mixant les éléments finis pour le domaine intérieur Ω_i et les éléments infinis pour le domaine extérieur Ω_o . La dérivation des éléments finis repose sur de classiques fonctions d'interpolation polynomiales. La sélection des fonctions d'interpolation relatives aux éléments infinis requiert une attention particulière de manière à vérifier les critères d'intégrabilité dans un domaine extérieur non borné. La sélection d'un schéma d'interpolation adapté aux éléments infinis résulte de l'examen de la solution exacte du problème de Helmholtz à l'extérieur d'une surface régulière sphérique, sphéroïdale ou ellipsoïdale contenant les sources. Une telle solution peut être décrite comme une somme comportant un nombre infini de termes formulés dans un système de coordonnées adaptées (coordonnées sphériques, sphéroïdales ou ellipsoïdales) :

$$p(r, \theta, \phi) = e^{-ikr} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{F_n(\theta, \phi)}{r^n} \quad (8)$$

où r est la coordonnées radiale et (θ, ϕ) sont les coordonnées angulaires. Une telle expansion vérifie a priori la condition de rayonnement de Sommerfeld. Le schéma d'interpolation des éléments infinis peut exploiter une variante tronquée de l'Eq. (8) incluant tous les termes jusqu'à l'ordre m . Le schéma d'interpolation selon les directions angulaires est basé sur des fonctions polynomiales conventionnelles $N(\xi, \eta)$ tandis que l'interpolation radiale exploite des fonctions $N_n(r, k)$ mettant en jeu des termes en $1/r^n$ multipliés par l'exponentielle complexe e^{-ikr} agissant comme facteur de phase. Les variantes proposées dans la littérature se distinguent essentiellement par le choix des fonctions tests mises en jeu dans la formulation faible du problème. Le schéma de Bettess-Burnett et le schéma conjugué de Burnett exploitent des fonctions test égales aux fonctions d'interpolation ou à leurs complexes conjugués, respectivement. Le schéma de Astley-Leis [5, 6] utilise des fonctions conjuguées mises à l'échelle pour les fonctions test :

$$W_{\mu\nu} = \frac{1}{r^2} Q_{\mu\nu}^*(r, \theta, \phi), \quad (9)$$

où le symbole * indique le complexe conjugué.

Des analyses numériques [7, 8] ont démontré que la sélection de schémas d'interpolation appropriés affecte fortement le conditionnement des matrices associées et constitue un ingrédient clé pour garantir de bonnes propriétés de convergence. Dans ce contexte, la sélection du schéma de Astley-Leis avec des polynômes de Legendre (shiftés) pour l'interpolation radiale donne lieu à une méthode robuste et efficace. La transformation de Prandtl-Glauert peut être utilisée pour dériver une formulation d'éléments infinis adaptée aux problèmes de propagation en présence d'un écoulement. L'écoulement moyen doit toutefois être uniforme dans le domaine extérieur associé aux éléments infinis mais peut être arbitraire dans le domaine interne.

3.2 Perfectly Matched Layer

3.2.1 Principes généraux

La conception générale d'une formulation PML repose sur l'introduction de termes dissipatifs dans les équations de propagation de manière à atténuer exponentiellement les ondes sortantes, tout en préservant la continuité du champ acoustique à l'interface entre le domaine interne et le domaine PML. De multiples variantes de la formulation PML peuvent être trouvées dans la littérature [9, 10]. Elles sont habituellement formulées en faisant appel à une transformation de coordonnées exploitant la sélection d'une direction de dilatation et le choix d'une fonction complexe de dilatation selon cette direction. De nombreux articles traitent la sélection de fonctions de dilatation optimales. On peut toutefois observer que les formulations PML existantes présentent un certain nombre de défauts :

- Elles sont habituellement limitées à une dilatation constante privilégiant une direction alignée avec un des axes de coordonnées. Ceci limite la mise en oeuvre de la méthode à des boîtes (coordonnées cartésiennes), des cylindres (coordonnées cylindriques) ou des sphères (coordonnées sphériques). De plus, cette option ne facilite pas la génération automatique de la couche PML et exige une intervention de l'utilisateur pour la définition des paramètres requis. Du coup, la sélection de la couche PML est quelque peu arbitraire et les multiples paramètres associés (combinés aux choix géométriques) rendent complexes la solution pour des non-experts. Il en résulte que le maillage automatique des domaines associés et le calcul automatisé du rayonnement acoustique sont malaisés.
- Elles sont habituellement et principalement utilisées pour l'acoustique conventionnelle où le fluide acoustique est supposé homogène et au repos. Certaines extensions sont disponibles dans le cas particulier où une description analytique des non-homogénéités est disponible. L'acoustique convectée est restreinte aux cas canonique où l'écoulement moyen est parfaitement aligné ou parfaitement perpendiculaire à la direction de dilatation. Enfin l'acoustique convectée introduit également des difficultés particulières pour certaines ondes (ondes amont inverses) plus difficiles à amortir. Des solutions sont parfois proposées pour ce cas mais elles sont souvent restreintes à des cas particuliers où l'écoulement est aligné avec la direction de dilatation.
- Elles se focalisent sur la sélection du meilleur choix pour la fonction de dilatation après avoir fixé la direction de dilatation. Le choix de cette direction est habituellement laissé à l'utilisateur de la méthode.

3.2.2 Implémentation

De nombreux logiciels commerciaux (tels que le logiciel ACTRAN [11]) ont introduit une extension de la méthode PML où la direction de dilatation n'est pas alignée avec les axes de coordonnées et peut varier spatialement. Fondamentalement, la direction de dilatation y est définie automatiquement en prenant comme référence une direction sortante approximativement perpendiculaire à l'interface

entre la domaine proche (faisant l'objet d'une discrétisation en éléments finis) et le domaine PML. Un champ pseudo-distance est calculé dans cette région PML via la résolution d'une équation de Poisson. Cette pseudo-distance permet de définir simultanément la fonction de dilatation et la direction de dilatation (définie comme le gradient de la pseudo-distance). Ceci autorise une définition entièrement automatisée des paramètres de la PML une fois que la géométrie de la couche a été spécifiée. La restriction habituelle de la méthode PML en termes géométriques est ainsi éliminée et les logiciels associés peuvent dès lors mettre en oeuvre la méthode dans le contexte d'une technique de maillage automatique. Ceci offre un avantage calcul important lors de simulation multi-fréquences car, de cette manière, l'épaisseur et la taille des éléments peuvent être adaptés en fonction de la fréquence (éléments de plus petite taille mais couche PML plus mince à hautes fréquences). Il convient de noter que l'approche PML n'est pas implémentée en pratiquant explicitement la dilatation de coordonnées. On peut montrer que l'effet de celle-ci conduit à transformer l'opérateur de Helmholtz (propagation dans un milieu au repos) en un opérateur modifié où la vitesse du son devient complexe et la densité scalaire est transformée en un tenseur complexe anisotrope du second ordre. L'implémentation consiste dès lors à évaluer correctement cette vitesse du son complexe et la densité tensorielle en fonction des propriétés du fluide, de la pseudo-distance et de son gradient.

3.2.3 Acoustique convectée

L'assouplissement des contraintes relatives à la géométrie et la sélection d'une direction de dilatation variable spatialement et définie automatiquement conduisent à des difficultés additionnelles en acoustique convectée. Il devient impossible dans ce contexte de garantir le respect d'une relation particulière entre la direction de dilatation et la direction de l'écoulement moyen. Il est dès lors difficile d'élaborer une méthode PML efficace capable d'absorber tout type d'onde acoustique, y compris les ondes amont inverses. Même le cas d'un écoulement constant se révèle malaisé à traiter car la direction de dilatation est arbitraire. On peut montrer toutefois qu'une formulation PML très générale pour l'acoustique convectée peut être obtenue en suivant la procédure suivante :

- Transformation de l'équation de Helmholtz convectée en une équation de Helmholtz classique (fluide au repos) en utilisant la transformation de Prandtl-Glauert ;
- Application de la dilatation de coordonnées relative à la méthode PML en vue de créer une couche absorbante PML décrite par une équation de Helmholtz modifiée avec une vitesse du son complexe et une densité tensorielle complexe et anisotrope ;
- Transformation inverse de l'équation de Helmholtz PML en utilisant la transformée inverse de Prandtl-Glauert.

Cette démarche conduit à une équation de Helmholtz convectée formulée dans l'espace original, sans aucun changement de variable. La vitesse du son, la densité et l'écoulement moyen associés à cette équation sont

directement reliés aux propriétés équivalentes du problème de Helmholtz convecté original mais modifiés de manière complexe via la dilatation de coordonnées dans la couche PML. En particulier, la densité qui était une grandeur scalaire réelle devient un tenseur du second ordre dont la valeur est une fonction algébrique du vecteur écoulement moyen et de la direction de dilatation. Les avantages de cette procédure sont les suivants :

- Les expressions obtenues sont valables pour un écoulement moyen arbitraire et pour n'importe quelle direction de dilatation et peuvent donc être facilement utilisées pour la définition automatique de la couche PML ;
- La méthode PML peut facilement absorber des ondes acoustiques rentrantes, en ce compris des ondes amont inverses. Dans le cas particulier où l'écoulement est aligné avec la direction de dilatation, la formulation présentée se révèle équivalente aux meilleures formulations présentées dans la littérature ;
- Quoique la transformation de Prandtl-Glauert et la transformation inverse ne soient valables que pour un écoulement moyen uniforme, elles ne constituent que des opérations intermédiaires. L'équation finale de Helmholtz convectée est obtenue dans l'espace non-transformé et peut être utilisée pour un écoulement moyen non-uniforme. Les tests numériques réalisés jusqu'à présent montrent que l'on n'observe aucune dégradation significative des capacités d'absorption lorsque l'écoulement moyen est non-uniforme.

La formulation NRBC ainsi obtenue est donc valable en acoustique convectée.¹ Elle est capable d'absorber efficacement les ondes acoustiques entrantes pour le problème de Helmholtz convecté sans introduire de restriction particulière au niveau de la géométrie de la couche absorbante ou de l'écoulement moyen. La méthode possède les mêmes avantages que la formulation PML mise en oeuvre pour un fluide au repos et n'est soumise à aucune limitation additionnelle. En particulier, elle est extrêmement bien adaptée aux procédures automatiques et aux stratégies de maillages adaptatifs habituellement sélectionnées pour des analyses multi-fréquences et constitue une bonne alternative aux méthodes d'éléments infinis pour une étude du rayonnement incluant une capacité de convection en champ lointain. Pour le rayonnement de moteurs d'avions à hautes fréquences, elle se révèle plus efficace du point de vue temps CPU que la méthode des éléments infinis (malgré le coût additionnel associé à la mise en oeuvre d'une représentation intégrale type FWH pour l'évaluation des pressions en champ lointain). Elle constitue donc une méthode NRBC de choix pour cette gamme de fréquences.

Les capacités offertes par les méthodes PML et IE sont illustrées par le cas du rayonnement d'une nacelle en présence d'un écoulement [12, 13]. La figure 2 illustre la couche d'éléments supportant le composant PML mis en oeuvre tandis que la figure 3 compare les solutions IE et PML à une fréquence de 2 kHz pour l'excitation associée à un mode plan.

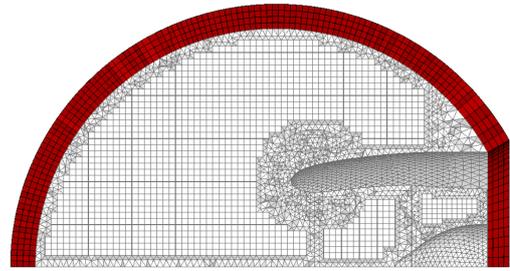


FIGURE 2 – Couche additionnelle d'éléments supportant le composant PML.

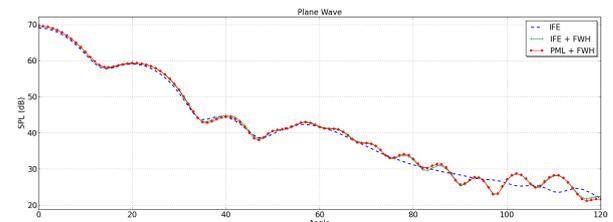


FIGURE 3 – Comparaison des résultats associés à différentes conditions non-réfléchissantes pour une excitation de type mode plan.

3.3 Approches modales et physiques

Les simulations vibro-acoustiques sont habituellement basées sur l'exploitation de méthodes d'éléments finis et conduisent à la résolution de systèmes algébriques ou différentiels de grande taille. Dans le domaine des fréquences, l'hypothèse d'un régime harmonique conduit à résoudre des systèmes algébriques formulés en variables complexes. La résolution de tels problèmes exploite habituellement des méthodes implicites. Le coût de ces calculs peut être exorbitant si la réponse doit être évaluée à hautes fréquences car les maillages d'éléments finis associés mettent en jeu un nombre considérable de degrés de liberté afin de capturer les courtes longueurs d'ondes présentes. Une réduction du temps de calcul est dès lors souhaitable. Deux stratégies peuvent se révéler particulièrement intéressantes dans ce contexte. La première consiste à mettre en oeuvre une approche étagée où les effets de couplage sont négligés ou traités de manière itérative. La seconde approche consiste à opérer une réduction modale pour l'un des sous-modèles présents et conduit à la résolution d'un problème hybride (modal/physique). Ces deux stratégies peuvent également être combinées de manière à gérer un modèle hybride via une procédure de solution étagée.

3.4 Hautes fréquences

Le traitement de certains problèmes acoustiques peut également s'appuyer sur la résolution des équations d'Euler linéarisées. Ce type de traitement requiert la mise en oeuvre de méthodes numériques performantes distribuant la charge de calcul sur plusieurs processeurs ou tirant bénéfice d'une accélération GP-GPU. Une méthode de type DGM (Discontinuous Galerkin Method) résolvant les équations dans le domaine temporel et assurant un faible niveau de dissipation et de dispersion s'inscrit parfaitement dans cette logique. Les éléments qui composent le domaine acoustique ont un ordre qui peut être très élevé et déterminé pour

1. L'implémentation de la méthode PML pour l'acoustique convectée dans le logiciel ACTRAN fait l'objet d'un brevet

assurer un niveau identique d'erreur dispersive et dissipative [14]. Cet ordre élevé permet d'avoir des éléments de grande taille, tout en s'adaptant à la géométrie du problème. Cette méthode permet de travailler dans le domaine des hautes fréquences (les longueurs d'ondes sont de l'ordre du 20ème ou du 50ème de la taille caractéristique de l'objet traité).

3.5 Approche stochastique non-paramétrique

Dans le domaine automobile, le traitement de caisses (habillées ou non) à moyenne fréquence requiert la gestion des incertitudes associées à la modélisation et aux données matérielles et géométriques. Une approche non-paramétrique a été développée par Soize [15, 16] et appliquée à des modèles vibro-acoustiques automobiles [17, 18]. Basée sur le principe de l'entropie maximum, cette méthode exploite un modèle de matrices aléatoires pour les contributions raideur, masse et amortissement. Dans le contexte ACTRAN, cette démarche est implémentée via une description modale du problème vibro-acoustique. Les modes in vacuo de la structure ainsi que les modes à parois rigides de la cavité supportent le modèle. De multiples réalisations des matrices modales associées, tant pour la structure que pour le fluide, sont générées sur base d'indicateurs globaux de variabilité. Le traitement de ces réalisations conduit au calcul des réponses correspondantes et, via un traitement statistique, aux indicateurs de dispersion de la réponse. Cette procédure est illustrée [19] par le traitement d'un modèle de véhicule (Figure 4). Le modèle de la caisse met en jeu 1.5 millions de degrés de liberté (1589 modes propres jusqu'à 600 Hz). Le modèle éléments finis de la cavité met en jeu 220.000 degrés de liberté (343 modes propres jusqu'à 800 Hz). La structure mécanique est excitée en deux points voisins des supports moteur. Les trois composants d'habillage sont inclus dans le modèle. La réponse acoustique est évaluée jusqu'à 300 Hz en 7 points intérieurs situés au voisinage de la tête du conducteur. La réponse est obtenue en supposant un niveau de variabilité $\delta_{K,S} = 0.05$ et en considérant 20 réalisations lors des simulations Monte-Carlo (Figure 5). Le traitement de cette application peut être considérablement accéléré en ayant recours à une parallélisation massive de la simulation Monte Carlo. Une autre approche consiste à exploiter les GP-GPU.

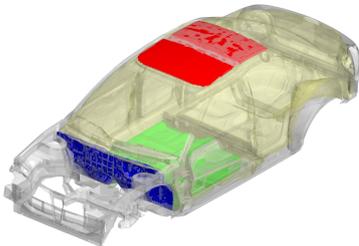


FIGURE 4 – Modèle de caisse : body-in-blue avec trois composants d'habillage (headliner, tapis et tableau de bord).

4 Conditions de chargement

4.1 Excitations aléatoires distribuées

Les excitations de type champ diffus ou couche limite turbulente [20] peuvent être assimilées à des processus

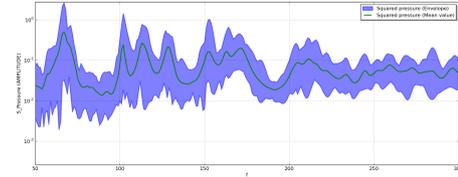


FIGURE 5 – Réponse non-déterministe : pression quadratique moyenne dans la cavité avec les matériaux d'habillage.

aléatoires (faiblement) stationnaires. Dans un contexte discret, elles sont habituellement caractérisées par une matrice (inter-)spectrale de puissance S_P . Une procédure efficace permettant le traitement d'une telle excitation passe par l'échantillonnage. La technique retenue exploite une décomposition de Cholesky de la matrice S_P d'ordre N (matrice hermitienne, définie positive) :

$$S_P(\omega) = L(\omega)L^H(\omega), \quad (10)$$

où $L(\omega)$ est une matrice triangulaire inférieure et H désigne la transposée de la matrice complexe conjuguée. La stratégie requiert également l'échantillonnage d'angles de phase ϕ_k (avec $1 \leq k \leq N_e$) dans l'intervalle $[0, 2\pi]$:

$$\phi_k = U(0, 1) 2\pi \quad k = 1, \dots, N_e, \quad (11)$$

où $U(0, 1)$ désigne une variable aléatoire uniforme dans l'intervalle $[0, 1]$. Le vecteur ζ des facteurs de phase aléatoires peut être généré sur base des angles de phase. La k ème composante de ce vecteur est donnée par

$$\zeta_k = e^{i\phi_k}, \quad (12)$$

et une réalisation particulière de Fourier p^s associée au processus aléatoire distribué s'obtient simplement à partir de la relation :

$$P^s = L(\omega)\zeta. \quad (13)$$

Cette réalisation particulière supporte ainsi la définition d'une excitation distribuée. La génération de réalisations multiples exploite donc une simple décomposition de Cholesky de la matrice S_P à chaque fréquence discrète. Chaque réalisation requiert la sélection d'un ensemble particulier d'angles de phase et un produit matrice-vecteur mettant en jeu le vecteur ζ des facteurs de phase. Chaque réalisation P^s de l'excitation aléatoire conduit à l'évaluation de la réponse numérique U^s (vecteur des déplacements nodaux) via la relation entrée-sortie (déterministe) du système. Les descripteurs statistiques peuvent être produits en utilisant des techniques de moyennage classiques. Ainsi le spectre de puissance du déplacement nodal U_i est obtenu par la relation :

$$S_{U_i}(\omega) = E \left[U_i^s(\omega) U_i^{s*}(\omega) \right], \quad (14)$$

où l'espérance mathématique prend en compte toutes les réponses échantillonnées.

Dans le cas particulier d'un champ diffus, une procédure d'échantillonnage direct est également possible. Elle consiste à générer divers ensembles d'ondes planes avec des phases aléatoires sélectionnées comme ci-dessus. Chaque ensemble d'ondes planes génère une excitation en pression bloquée le long de la surface de chargement. A nouveau, des opérations statistiques sont menées sur les réponses individuelles associées aux différents cas de charge afin d'évaluer la matrice inter-spectrale S_U .

4.2 Chargement aéro-acoustique

Le chargement de pression fluide sur la surface flexible d'un composant mécanique se décompose en une partie turbulente, associée à des structures petites et fortement énergétiques, et une partie acoustique liée aux phénomènes compressibles pour laquelle la longueur caractéristique est plus grande et le niveau plus faible. Ces deux parties coexistent physiquement, mais il est délicat d'obtenir la contribution acoustique précisément sans l'emploi de techniques particulières.

L'expérience et la simulation montrent que le niveau de bruit à l'intérieur des véhicules est plus sensible à la composante acoustique extérieure qu'à la partie turbulente extérieure pourtant plus énergétique. Cette particularité explique l'attention particulière accordée à l'identification précise et efficace de la contribution acoustique.

La première approche consiste à utiliser des résultats de simulation CFD compressible. Pour les problèmes à faible vitesse, ceci augmente le coût calcul. Une approche alternative consiste à procéder à une simulation aéroacoustique extérieure pour recalculer, sur base de sources de bruit turbulentes extérieures, la composante acoustique qui impacte le vitrage ou les parties flexibles. Cette approche hybride permet de découpler les phénomènes turbulents incompressibles des phénomènes acoustiques et de sélectionner l'approche la plus pertinente et la plus efficace pour ces phases de calcul. Le coût de la simulation fluide n'est alors plus impacté par la résolution de la composante acoustique.

Dans les phases avancées de conception, des méthodes d'analyse permettent de déterminer l'amplitude de la composante acoustique qui se transmet efficacement à l'intérieur du véhicule. C'est le cas des techniques proposant la décomposition en nombre d'onde sur une fenêtre d'analyse rectangulaire, mais aussi d'une méthode alternative décomposant le signal de pression en modes pelliculaires qui s'appliquent sur des surfaces quelconques [21]. Cette dernière méthode permet d'ailleurs de reproduire un champ filtré suivant certains critères propres à l'acoustique pour classer les différentes excitations associées à différents concepts.

5 Conclusions

La simulation aéro-vibro-acoustique a connu de spectaculaires développements ces dernières années. Les principaux ingrédients que nécessitent de telles simulations concernent les opérateurs de propagation, les mécanismes d'amortissement, les méthodes numériques privilégiées et la description des conditions de chargement. Les principales avancées réalisées dans ces différents domaines dans le cadre du développement du logiciel ACTRAN [11] ont été décrites. Les principaux challenges à relever concernent le traitement de problèmes de très grande taille (associés aux problématiques MF et HF) ainsi que la gestion des incertitudes.

Références

- [1] C. Sambuc, G. Lielens and J.P. Coyette An extension of the Low Reduced Frequency model for viscothermal acoustic propagation within waveguides, *Proceedings Internoise Conference* (2012).
- [2] C. Sambuc Refined damped equivalent fluid models for acoustics, *PhD thesis, Université Libre de Bruxelles* (2015).
- [3] C. Sambuc, G. Lielens and J.P. Coyette Numerical modelling of viscothermal acoustics using finite elements, *Proceedings ISMA Conference* (2014).
- [4] K. Gerdes A summary of infinite element formulations for exterior Helmholtz problems, *Computer Methods in Applied Mechanical Engineering* **164**, 95-105 (1998).
- [5] R. J. Astley, G. J. Macaulay and J. P. Coyette Mapped wave envelope elements for acoustical radiation and scattering, *Journal of Sound and Vibration* **170**, 97-118 (1994).
- [6] R. J. Astley, J. P. Coyette and L. Cremers Three-dimensional wave envelope elements of variable order for acoustic radiation and scattering. I. Formulation in the frequency domain, *Journal of the Acoustical Society of America* **103**, 49-63 (1998).
- [7] R. J. Astley and J. P. Coyette The performances of spheroidal infinite elements, *International Journal for Numerical Methods in Engineering* **52**, 1379-1396 (2001).
- [8] R. J. Astley and J. P. Coyette Conditioning of infinite element schemes for wave problems, *Communications in Numerical Methods in Engineering* **17**, 31-41 (2001).
- [9] J.E. Berenger A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves, *Journal of Computational Physics* **114**, 185-200 (1994).
- [10] E. Turkel and A. Yefet Absorbing PML boundary layers for wave-like equations, *Journal of Applied Numerical Mathematics* **27**, 533-557 (1998).
- [11] Free Field Technologies *Actran 16.0 User's guide*, Free Field Technologies, Belgium (2015).
- [12] B. Van Antwerpen, Y. Detandt, D. Copiello, E. Rosseel and E. Gaudry Performance improvements and new solution strategies of Actran TM for nacelle simulations, *Proceedings AIAA Conference* **2315**, (2014).
- [13] B. Van den Nieuwenhof, G. Lielens, J.P. Coyette Efficient simulation of the acoustic radiation, *Proceedings NOVEM 2015*, (2015).
- [14] A. Mosson, D. Binet and J. Caprile Simulation of installation effects of aircraft engine rear fan noise with Actran DGM, *Proceedings AIAA Conference* **3188**, (2014).
- [15] C. Soize A nonparametric model of random uncertainties for reduced matrix models in structural dynamics, *Probabilistic Engineering Mechanics* **15**, 277-294 (2000).
- [16] C. Soize Maximum entropy approach for modeling random uncertainties in transient elastodynamics, *Journal of the Acoustical Society of America* **109**, 1979-1996 (2001).
- [17] J. F. Durand *Modélisation de véhicules automobiles en vibroacoustique numérique avec incertitude de modélisation et validation expérimentales*, Université de Marne-la-Vallée (2007).
- [18] L. Gagliardini About the modelling of dispersed vibroacoustic frequency response functions of serial production vehicles, *Congrès Simulation SIA* (2015).
- [19] G. Lielens, B. Van den Nieuwenhof, J. Davis Efficient non-deterministic analysis of large trimmed car models by modal approaches using GPU-accelerated computing, *Aachen Acoustics Colloquium*, (2015).
- [20] J. P. Coyette and K. Meerbergen An efficient computational procedure for random vibro-acoustic simulations, *Journal of Sound and Vibration* **310**, 448-458 (2008).
- [21] B. Ganty, D. Copiello, Y. Detandt and C. Jeong A method to identify the acoustic contribution in pressure fluctuations acting on a realistic car's side window, *Proceedings Internoise Conference*, (2015).