

UNE STRATEGIE DE CALCUL POUR LES PROBLEMES VIBRO-ACOUSTIQUES DANS L'INDUSTRIE AERONAUTIQUE * LA METHODE C.F.E.S. *

P. LAMARY,

DASSAULT AVIATION, DIVISION CALCUL DES STRUCTURES, 92214 ST CLOUD.

1. INTRODUCTION

1.1 Etat de l'art

Depuis une quinzaine d'années (avec l'avènement des ordinateurs), les problèmes vibro-acoustiques motivent nouvellement les chercheurs et les industriels jusqu'à placer la maîtrise de ces problèmes et la réduction du bruit au coeur de nouveaux enjeux économiques.

Dans un premier temps, l'arrivée des ordinateurs conjuguée aux méthodes numériques par éléments finis servit avec succès le domaine du calcul des structures. Dans un deuxième temps, l'augmentation des performances des machines, la maîtrise et l'émergence de nouvelles méthodes numériques permirent le calcul de problèmes acoustiques sans solution analytique et gourmands en temps de calcul. A ce stade, il ne restait qu'un petit pas à franchir pour passer au couplage élasto-acoustique. Cependant, aujourd'hui, malgré la maturité des formulations théoriques couplées fluide/structure, force est de constater, qu'en pratique, les premiers logiciels généralistes nés de cette conjoncture restent d'une utilisation délicate dans le cadre d'applications industrielles. Ainsi, la recherche de méthodes d'approximations plus prédictives dans l'ensemble des gammes de fréquences (BF, MF, HF), la recherche d'algorithmes plus rapides (donc moins onéreux), la recherche d'une meilleure intégration logiciel, soit autrement dit, la recherche d'outils de calcul plus opérationnels industriellement demeure un domaine d'étude largement ouvert et d'actualité.

C'est dans ce contexte et pour s'assurer de pouvoir mener à bien des calculs à échelle industrielle dans un rapport coût-efficacité intéressant que l'on a été amené à spécifier un logiciel vibro-acoustique sous un jour intégrant à la fois les dernières avancées théoriques mais aussi intégrant des facteurs liés à la qualité logiciel et à la culture technique société.

Aujourd'hui, la stratégie de calcul développée par Dassault Aviation qui en vibro-acoustique supporte cette nouvelle génération de logiciel est connue sous le nom de CFES method pour Coupling Finite Element and Singularity method. Cette méthode [1], intégrée et héritée de notre expérience et de nos outils d'analyse aéro-élastique [2,3], que nous présenterons est intéressante à plus d'un titre par l'approche système qu'elle autorise et par le concept de grille de couplage qu'elle manipule.

LA METHODE CFES

1.2 Position du problème

Le problème de base que nous cherchons à résoudre et qui intéresse Dassault Aviation, est illustré par la figure 1. Il s'agit d'un avion en vol, qui se trouve sollicité par le flux d'air arrivant sur ses ailes et son fuselage, mais aussi par le bruit et le balourd des réacteurs. Les ondes aériennes et les ondes structurales se transmettent au fuselage qui se met à vibrer et excite à son tour la cabine. L'avionneur s'intéresse alors, à la fois aux contraintes générées dans la structure pour son dimensionnement, et aussi au bruit interne pour le confort des passagers ou encore aux bruits externes nuisant à l'environnement.

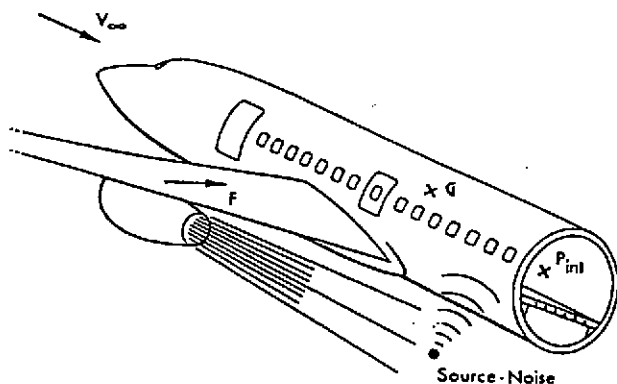


FIGURE 1 TYPICAL APPLICATION

Bien entendu, de nombreux sous-systèmes avion sont aussi concernés par les problèmes vibro-acoustiques comme les tuyauteries où les pompes de débit qui se couplent aux fluides contenus dans les canalisations peuvent amplifier les vibrations jusqu'à rupture. De même, on peut envisager le ballonnement liquide des réservoirs remplis de pétrole, l'étude du bruit à l'intérieur de petites cavités contenant des équipements sensibles ou encore le calcul des sous-structures en moyens d'essais (chambres acoustiques, etc...).

Pour traiter ces problèmes et dans le cadre de cette présentation, nous restons dans le domaine de la dynamique linéaire, de l'acoustique linéaire et des basses à moyennes fréquences.

LA METHODE CFES

2. STRATEGIE DE CALCUL

2.1 idées directrices

Comme nous le précisons dans l'introduction, le fait de viser l'élaboration d'un logiciel général vibro-acoustique à caractère industriel, nous a amené à considérer des critères liés à la qualité logiciel (robustesse des méthodes de calcul, etc...), des critères liés à la manière de travailler en bureaux d'étude (organisation des équipes, organisation des projets), des critères liés à la culture des utilisateurs (traditions, ingénieurs structure ou acousticiens familiarisés avec notre logiciel principal Catia-Elfini).

L'analyse de ces spécifications a conduit à favoriser une approche méthodologique que l'on peut qualifier 'd'approche système' qui décompose le système couplé fluide/structure à étudier en sous-systèmes (fluide interne, fluide externe, structure seule). Chacun de ces sous-systèmes sont traités séparément avec les méthodes d'analyse les mieux adaptées, méthode d'éléments finis (FEM) en acoustique interne et structure, méthode d'éléments frontière (BEM) pour l'acoustique externe [4].

A ce stade est introduit une notion importante: la réduction de la taille des modèles élémentaires, en exprimant ceux-ci dans des bases de déformées particulières modales, monomiales, bases enrichies de déformées de chargements statiques, de déplacements rigides ou de degrés frontières. Cette phase de réduction des sous-systèmes en modèles dynamiques représente le gros des calculs.

Les couplages entre les sous-systèmes réduits interviennent à posteriori au gré de la complexité voulue. Notons, comme nous le verrons plus en détail, que les modèles élémentaires, optimisés en particulier au regard des finesses de maillage n'ont aucune raison de coïncider. De ce fait, il a été développer des techniques de couplage élaborées qui ont données le jour au concept de 'modèle de couplage' ou 'grille de couplage'.

Par notre approche, il est à noter que nous tournons le dos à l'implémentation directe de formulations couplées globales, pour ne retenir de la théorie de celles-ci, uniquement la certitude de l'existence de solutions. Ainsi, au lieu de résoudre un problème figé, nous construisons pas à pas, à partir des modèles élémentaires, un modèle général 'avion'. Ce modèle est évolutif, au sens ou, au-delà des seuls problèmes d'interaction fluides/structures, il pourra facilement être compléter par l'introduction de modèles supplémentaires spécifiques: modèles d'asservissement par exemple, modèles de matériaux absorbants, modèles dynamiques locaux, modèles de recalage, etc...).

LA METHODE CFES

2.2 Méthodes de calcul retenues

Dans l'éventail des méthodes existantes [5, chap.9], nous utilisons communément une méthode d'éléments finis pour traiter la structure alors que, fort d'une méthode de couplage déconnectant structure et acoustique, nous choisissons pour chacun des domaines intérieurs et extérieurs les méthodes les mieux adaptées. Ainsi l'acoustique interne est traitée par une méthode d'éléments finis acoustiques en pression, qui certes nécessite le maillage volumique de la cavité mais avec des éléments à 1 degré de liberté par noeud et surtout aboutit à un système dynamique formé de matrices constantes en fonction de la fréquence. L'analyse modale décompose alors facilement les solutions puisqu' apparaissent dans les domaines bornés des ondes stationnaires. Par contre, le domaine acoustique extérieur étant non borné, le maillage d'un grand domaine autour de l'objet avec des conditions aux limites difficiles à mettre en place [6] semble illusoire et l'on préfère utiliser classiquement la formulation intégrale de Green qui à l'avantage de dégénérer le problème aux seules frontières de la structure, de pouvoir choisir des solutions élémentaires qui vérifient automatiquement la condition de propagation de l'onde à l'infini, mais a l'inconvénient de nécessiter un calcul à chaque fréquence. L'intégrale de Green est directement calculée par une méthode de Singularités réputée plus rapide que les formulations variationnelles [7]. Notons qu'en pratique, les problèmes sans écoulement (élasto-acoustiques) ou avec écoulement (aéro-élastiques) procèdent des mêmes méthodes et outils logiciels.

2.3 Grille de couplage

Le concept de grille de couplage est né de la réelle nécessité de pouvoir transférer des informations entre modèles de calculs non compatibles ou entre un modèle et l'extérieur de manière efficace et rationnelle. L'idée directrice est pour avoir deux entités à coupler d'en créer une troisième. Cette nouvelle entité dans sa forme dépouillée étant un maillage s'est vue attribuée le nom de 'grille'. Puisqu'étant un maillage, elle a pu bénéficier de tous les niveaux de stockage réservés à l'origine dans le code pour les modèles réels (structure, acoustique, thermique) jusqu'à posséder ses propres fonctionnalités calculatoires pour préconditionner les couplages et s'est vue naturellement qualifiée de 'grille de calculs', 'grille de couplage' ou de 'modèle de couplage'.

A la différence des méthodes existantes, le couplage élasto-acoustique s'effectue donc par l'intermédiaire de grilles frontières. Les grilles modélisent l'interface entre ces maillages qui n'ont aucune raison de coïncider: soit parce que les modèles à coupler ont été définis indépendamment, soit parce que les critères de finesse sont différents, soit encore parce que les maillages qui ne s'appuient pas nécessairement sur les formes géométriques réelles laissent 'un jour' à l'interface.

LA METHODE CFES

La grille permet tout d'abord de s'affranchir des non-coïncidences des maillages aux interfaces de couplage, mais surtout, elle doit être vue comme le support des informations de tout couplage. Notre logiciel est actuellement apte à coupler les trois méthodes utilisées pour l'acoustique interne, l'acoustique externe, et la structure. De plus, le modèle de couplage ouvre un espace de travail effectif qui se prête facilement au développement de méthodes complémentaires pour le couplage avec des sous-systèmes déjà élaborés ou le mixage de différentes méthodes.

Finalement, d'un point de vue organisationnel, la grille est tant au niveau de l'enchaînement des étapes d'un calcul industriel qu'au niveau de la gestion du logiciel un atout considérable.

La figure 2 présente l'organisation des calculs dans la méthode CFES.

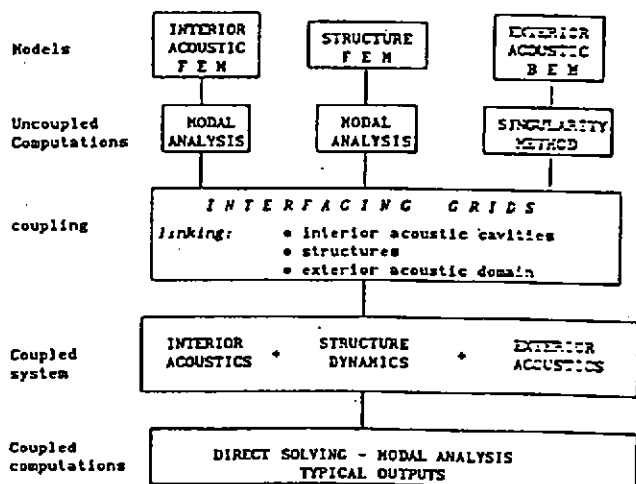


FIGURE 2 COMPUTATIONAL MANAGEMENT

3 THEORIE

Soit à résoudre le problème typique présenté en 1.1 (figure 1). Nous rappelons succinctement dans cette partie les équations fondamentales issues des méthodes retenues en suivant le cheminement d'un calcul couplé par la méthode CFES.

LA METHODE CFES

3.1 Equations du problème

Dans un premier temps, le système vibro-acoustique global est décomposé en sous-systèmes de même nature physique et mathématique qui permettent d'élaborer les modèles dynamiques élémentaires. Pour notre exemple, nous sommes amenés à distinguer: le domaine de l'acoustique interne (cavités internes), constitué par la cabine de l'avion (maillée en volume), le domaine de la dynamique structure, composé du fuselage et des structures dynamiquement travaillantes, et le domaine de l'aéro-acoustique externe prenant en compte l'espace extérieur entourant l'avion.

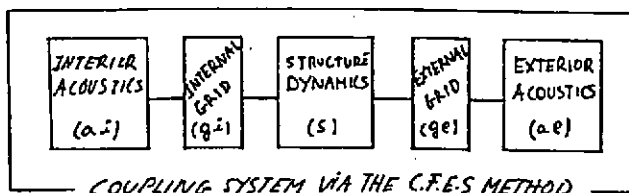


FIGURE 3 COUPLING SYSTEM APPROACH

En considérant, selon la CFES méthode, que chacun de ces sous-systèmes ne voit aux interfaces que des grilles de couplage (cf figure 3) et en appliquant les méthodes de résolution présentées § 2.2, les équations de chacun de ces 3 modèles dynamiques réduits s'écrivent respectivement:

$$[m_{ai}]p_{ai} + [k_{ai}]p_{ai} = p_{ai} [\partial f_{ai} / \partial X_{gi}] X_{gi} \quad (1)$$

$$[m_s]x_s + [k_s]x_s = [\partial f_s / \partial P_{gi}] P_{gi} + [\partial f_s / \partial P_{ge}] P_{ge} \quad (2)$$

$$p_{ae} = [A(V_\infty, t)] [\partial X_{ae} / \partial X_{ge}] X_{ge} \quad (3)$$

avec,

P, degré de liberté (ddl) de pression en base Eléments Finis (EF), p, ddl de pression réduite dans la base du Modèle Dynamique (MD) considéré, X et x, ddl de déplacement en EF et en MD, f, ddl de force en MD,

[m] et [k] étant les matrices de masse et de rigidité réduites dans la base du MD considéré,

[A] étant une matrice complexe, dépendant du temps, formée en inversant la matrice des coefficients d'influences entre les pressions P_{ae} et les déplacements acoustiques normaux X_{ae} dus aux déplacements de la grille externe X_{ge} .

LA METHODE CFES

Dans les seconds membres, les termes en $\{\partial/\partial q\}$ mettent en évidence les opérateurs gérant le passage des ddl des modèles de grille de couplage aux ddl des modèles physiques. Ces opérateurs sont calculés par une technique de multichargements unitaires vérifiant au mieux le principe des travaux virtuels.

Dans un deuxième temps, le couplage élasto-acoustique consiste à résoudre simultanément les équations préconditionnées (1), (2) et (3) en éliminant les ddl des grilles de couplage.

Nous choisissons pour le couplage interne de procéder à un assemblage de (1) et (2) avec $X_{q1} = [\partial X_{q1}/\partial x_s]x_s$ et $P_{q1} = [\partial P_{q1}/\partial p_{a1}]p_{a1}$, alors que pour le couplage externe nous choisissons de condenser (3) sur (2) avec $x_{qe} = [\partial x_{qe}/\partial x_s]x_s$ et $P_{qe} = [\partial P_{qe}/\partial p_{ae}]p_{ae}$.

Finalement, le système couplé total s'écrit en régime harmonique,

$$\begin{cases} -\omega^2[m_{a1}]p_{a1} + [k_{a1}]p_{a1} = -\omega^2\rho[\partial x_{a1}/\partial X_{q1}][\partial X_{q1}/\partial x_s]x_s \\ -\omega^2[m_s]x_s + [k_s]x_s = \{\partial f_s/\partial P_{q1}\}[\partial P_{q1}/\partial p_{a1}]p_{a1} \\ \quad + \{\partial f_s/\partial P_{qe}\}[\partial P_{qe}/\partial p_{ae}][a][\partial x_{qe}/\partial x_s]x_s \end{cases}$$

ou sous forme matricielle, en rajoutant des chargements imposés \bar{x}_{a1} , \bar{f}_s et \bar{f}_s^e dans les seconds membres, par:

$$-\omega^2 \begin{bmatrix} m_a & -\rho^t c^1 \\ 0 & m_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} p_{a1} \\ x_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_a & 0 \\ c^1 & k_s - c^e \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} p_{a1} \\ x_s \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\omega^2 \rho \bar{x}_{a1} \\ \bar{f}_s + \bar{f}_s^e \end{Bmatrix} \quad (4)$$

avec: • c^1 , rendant compte du couplage interne,

$$c^1 = -\{\partial f_s/\partial P_{q1}\}^t [\partial p_{a1}/\partial P_{q1}] = {}^t\{[\partial x_{a1}/\partial X_{q1}]^t [\partial x_s/\partial X_{q1}]\}$$

• c^e , rendant compte du couplage externe,

$$c^e(\omega) = \{\partial f_s/\partial P_{qe}\}[\partial P_{qe}/\partial p_{ae}][a][\partial x_{qe}/\partial x_s] \\ [a] = [A(V\omega, \omega)][\partial X_{ae}/\partial x_{qe}]$$

3.2 Résolution

Le système (4) peut s'écrire avec des grandeurs généralisées sous la forme d'un système dynamique du 2ème ordre, $-\omega^2 mx + k(\omega)x = f$, dont on étudie classiquement la stabilité.

Lorsqu'il n'y a pas de couplage externe, k est indépendante de la fréquence et il est intéressant de re-diagonaliser celui-ci dans la base des modes élasto-acoustiques internes.

LA METHODE CFES

3.3 exemple

la figure 4 illustre une application aérospatiale du couplage élasto-acoustique.

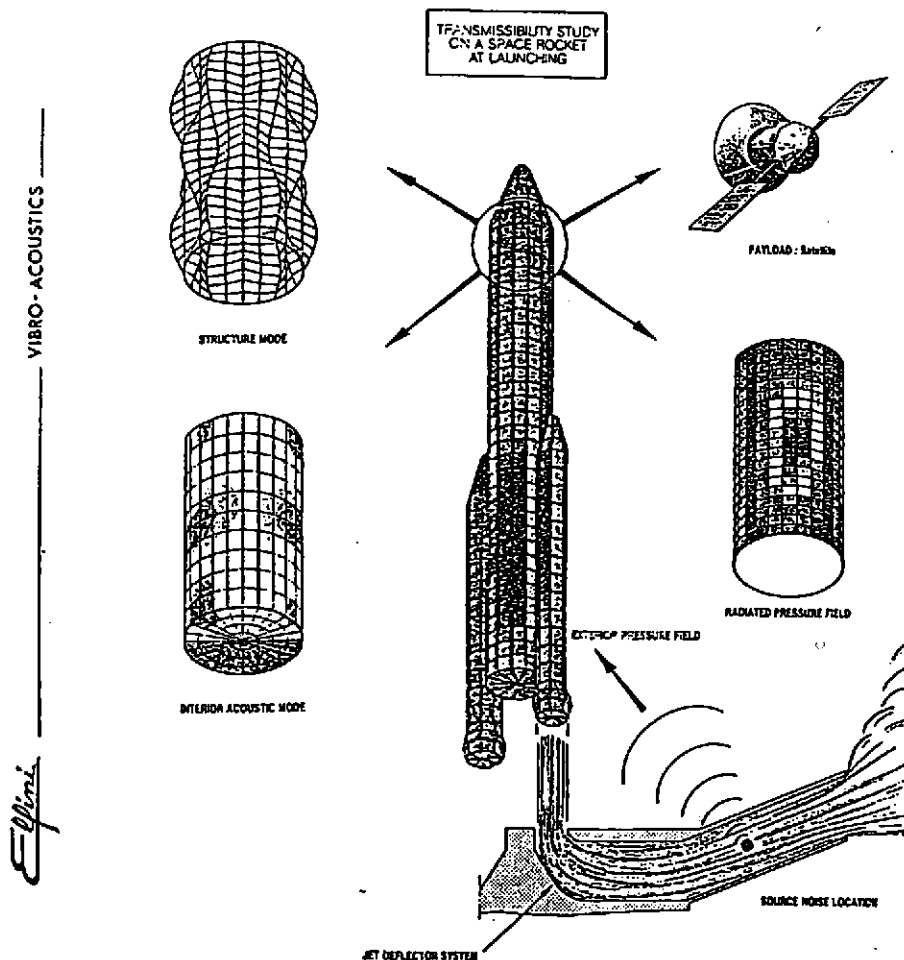


FIGURE 4 GENERAL VIBRO-ACOUSTIC COUPLING EXAMPLE
(interior acoustics + structure dynamics + exterior acoustics)

LA METHODE CFES

4 CONCLUSION ET TRAVAUX ACTUELS

Pour les préoccupations d'un avionneur comme Dassault, la méthode proposée est attrayante et devrait permettre de résoudre de manière satisfaisante les problèmes de couplage élasto-acoustique.

A ce jour, la méthode CFES a passé avec succès un ensemble de benchmark qui permettent d'en établir les premières règles d'emploi et de cerner son domaine de validité. Plus encore, elle reçoit (actuellement) son baptême du feu dans le cadre des projets d'avions civils pour lesquels l'ensemble de notre stratégie de calcul en vibro-acoustique est mise à l'épreuve.

En ce qui concerne nos travaux de développement logiciel, ceux-ci entrent dans une phase des plus intéressante. En effet, si dans un premier temps nous avons atteint l'objectif de recouvrir au travers de notre méthode les fonctionnalités habituelles d'un logiciel du même type, il s'agit maintenant de tirer partie de l'architecture mise en place. Celle-ci, devrait permettre des développements rapides dans des domaines avancés de la vibro-acoustique comme l'optimisation, le contrôle actif, le recalage de modèle ou l'élaboration de modèles moyennes fréquences.

5 REFERENCES

- [1] P. LAMARY, "Une méthode de couplage élasto-acoustique par opérateur de grille frontière pour discrétisations acoustique et structure non coïncidentes". Thèse de Doctorat U.T.C - 18 décembre 1992
- [2] C. PETIAU, S. BRUN, "Tendances actuelles de l'analyse Aéroélastique des avions militaires". AAAF, n°122, 1987-1-1
- [3] Ph. NICOT, C. PETIAU, "Aeroelasticity Analysis Using Finite Element Models". European Forum on Aeroelasticity and Structural Dynamics". 04 1989
- [4] "Boundary élément method in acoustics" Computational Mechanics Publications, Elsevier Applied Science - 1991
- [5] C. LESUEUR, "Rayonnement acoustique des structures". Edition Eyrolles Paris (1981)
- [6] B. NICOLAS-VULLIERME, "Vibrations de Systèmes Couplés Fluide-Structure, en milieu non borné". Cours de l'ENSTA, 1989
- [7] M.A. HAMDI, "Formulation variationnelle par équations intégrales pour le calcul de champs acoustiques proches et lointains". Thèse de Doctorat d'état U.T.C - 4 juillet 1984

