

Méthodes prévisionnelles vibroacoustiques hautes fréquences pour l'aide à la conception de véhicules silencieux

Gérard Borello,
InterAC,
10, impasse Borde-Basse,
31240 L'Union,
France,
Tél : + 33 (0) 5 61 09 47 45,
Fax : +33 (0) 5 61 74 62 22
E-mail : interac@dialup.francenet.fr

The Statistical Energy Analysis (SEA) techniques are now widely used for modeling complex design vehicles in order to derive noise specifications and to optimize the design.

Les systèmes soumis à des excitations mécaniques et acoustiques aléatoire et large bande sont difficiles à analyser par des méthodes déterministes basées sur une discrétisation par éléments finis ou une synthèse modale. C'est en particulier le cas pour les structures des avions qui du fait de leur grande taille, présentent un très grand nombre de fréquences de résonance au-delà de 100 à 200 Hz. Calculée sur l'ensemble du spectre audible (20-20 000 Hz), la réponse vibratoire du fuselage ou le bruit transmis par cette vibration en cabine généré par l'écoulement aérodynamique turbulent, nécessite donc des techniques plus adaptées que celles proposées par les codes de calcul basés sur les méthodes éléments finis.

Les méthodes basées sur le principe de la conservation de l'énergie vibratoire, fournissent une alternative remarquablement efficace pour cette catégorie de problèmes. La plus connue et aussi la plus utilisée de ces techniques dans le domaine aérospatial est l'Analyse Statistique Énergétique. Sous son acronyme SEA (Statistical Energy Analysis [1]), cette méthode de calcul permet de modéliser un aéroplane complet en introduisant tous les types d'excitation à l'origine du bruit : bruit de motorisation, de couche limite, bruit des organes internes (ventilation, climatisation...). De fait cette technique de calcul est devenue un standard dans les industries des satellites ou des lanceurs spatiaux. Elle a permis d'établir l'environnement acoustique au décollage des lanceurs européens de la famille Ariane et de ces organes moteurs tel le moteur cryogénique VULCAIN, propulsant le corps central d'Ariane 5 [2 et 3]. L'agence spatiale européenne utilise aussi la SEA pour élaborer les spécifications d'environnement en microgravité du module européen de station orbitale qui doit dans les années futures venir rejoindre sur orbite la station Freedom[4]...

Utilisation de la méthode SEA

Dans son principe, la méthode SEA permet de transformer un problème de couplage vibratoire complexe en un schéma de couplage simple représenté sur la figure 1. Dans ce schéma, les forces extérieures fournissent une

puissance mécanique injectée dans l'élément auquel elles sont appliquées. Cette puissance est d'une part dissipée dans l'élément (en général sous forme thermique) au prorata de l'énergie vibratoire interne, E , stockée et d'un facteur de perte par dissipation dont la connaissance est généralement empirique et d'autre part échangé avec le ou les éléments qui lui sont reliés. Cet échange est proportionnel à un coefficient de perte par couplage et à la différence des énergies vibratoires stockées dans les éléments couplés ainsi que le suggère l'analogie hydraulique de la figure 1. Pour calculer les énergies vibratoires (ou dans les hauteurs de fluide dans la figure 1); il suffit donc de connaître la puissance injectée par les forces extérieures (débit de la source) et les valeurs des facteurs de perte par couplage et par forces extérieures (débit de la source) et les valeurs des facteurs de perte par couplage et par dissipation. En fait, cette analogie s'applique à chacun des modes de résonance des systèmes 1 et 2 couplés et l'énergie E s'interprète comme l'énergie par mode de vibration du système dont la fréquence est contenue dans la bande de fréquences d'analyse.

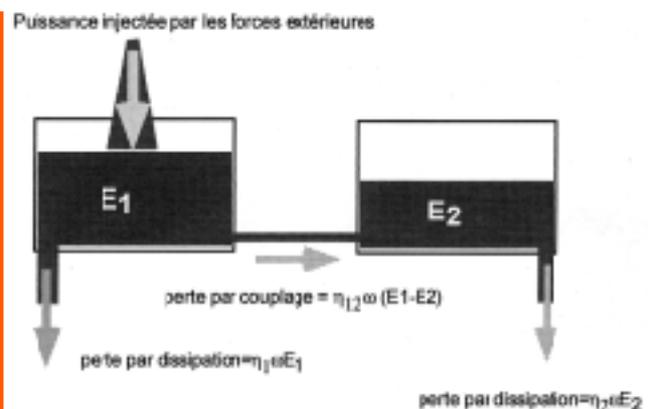


Figure 1 : L'équilibre énergétique de deux systèmes dynamiques couplés.

La modélisation SEA permet d'estimer statistiquement les nombres de modes présents dans une bande de fréquences ainsi que les différents coefficients de couplage. Les paramètres de calcul d'un modèle prévisionnel SEA sont généralement obtenus par des bibliothèques de formules

mathématiques basées sur des modèles de comportement vibratoire de structures simples pouvant se résoudre analytiquement (formules explicites). Ces formules sont mises à disposition de l'ingénieur dans des codes de calcul tels que VAPEPS et AutoSEA [5] et permettent notamment de calculer les facteurs de perte par couplage des différents éléments couplés.

En parallèle de l'approche théorique analytique de la SEA, une approche SEA expérimentale s'est développée depuis une dizaine d'années. Cette approche permet le mesurage de tous les paramètres énergétiques décrivant un système vibratoire dans un modèle SEA. Il est ainsi possible d'hybrider modélisations théorique et expérimentale pour construire des modèles robustes de comportement vibratoire d'un véhicule en fonctionnement. Une fois construit et validé, le modèle du véhicule met en interaction l'environnement extérieur, source d'excitation, et la structure du véhicule, ce qui inclut les volumes acoustiques intérieurs. On peut donc prévoir les spectres résultant de bruit en cabine pour un chargement extérieur donné et chiffrer ainsi le confort acoustique résultant.

À partir de ce modèle, il est possible dans une seconde phase de modifier les paramètres SEA afin d'améliorer le niveau de confort. Cette phase que nous appelons optimisation acoustique du véhicule s'appuie sur une recherche théorique de tous les chemins de transmission et une hiérarchisation des sources de bruit qui contribuent le plus aux nuisances sonores.

Le modèle SEA permet donc d'effectuer une optimisation acoustique virtuelle du véhicule. Cette optimisation implique en général de limiter les variations possibles de certains paramètres dans la mesure où ils traduisent une modification conséquente d'un élément de structure, modification qui doit être physiquement réalisable.

Application de la SEA à l'analyse conceptuelle de la transmission des vibrations dans un aéronef

Le principal avantage de la méthode SEA est le petit nombre de paramètres requis dans un modèle. Un avion peut se modéliser par quelques dizaines d'éléments SEA, chaque élément étant décrit lui-même par un nombre limité de paramètres. Par exemple, si le fuselage est décrit par un élément de cylindre en flexion (le déplacement induit par la vibration est normal à la coque), la description de cet



Figure 2 : Paramètres descriptifs d'un élément de fuselage dans une modélisation SEA d'un aéronef dans le logiciel AutoSEA.

élément ne requiert que les paramètres qui apparaissent dans la boîte de dialogue de la figure 2. La coque externe est ainsi construite en aluminium. Le fuselage a une longueur et un rayon et il possède des cadres et des lisses définis par leur matériau (aluminium), leur espacement moyen et leur propriété d'inertie en flexion. Le matériau est lui-même décrit dans la base de données du code par ses paramètres élastiques (module d'Young, densité, coefficient de Poisson...).

À partir de ces quelques paramètres le code (ici le logiciel AutoSEA) calcule les paramètres plus globaux qui vont gouverner l'équilibre énergétique de cet élément lorsqu'il est connecté aux autres éléments de structure. Sur la figure 3, le code calcule le nombre de modes par bande de fréquences pour l'élément de fuselage de la figure précédente. On constate que du fait de la taille importante de l'élément de fuselage, il y a environ 2 000 modes de résonance dans la bande d'octave centrée autour 500 Hz et environ 10 000 pour celle centrée autour de 2 000 Hz.

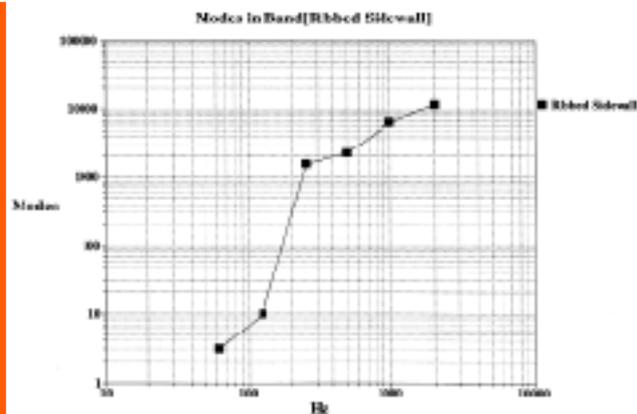


Figure 3 : Nombre de modes par bande d'octave calculé pour le fuselage.

On décrit ensuite de la même manière les autres éléments du fuselage la cabine, le plancher et les excitations extérieures sous forme de pression, torseur d'effort ou génération de puissance mécanique. Les éléments sont ensuite couplés entre eux. La figure 4 montre un modèle SEA simple d'une partie d'un aéronef tel qu'il est généré dans la page de travail du logiciel AutoSEA. Ce modèle SEA est formé d'un plancher de type sandwich et deux éléments de fuselage, de la structure d'attache du moteur arrière (aft engine pylon) et de la cabine passager. On injecte sur l'élément d'attache la puissance mécanique fournie par le moteur qui ici a été mesurée et importée dans le modèle. On excite le fuselage par un bruit aérodynamique turbulent dont les caractéristiques spectrales et interspectrales sont calculées à partir des données de la figure 6, définies par l'utilisateur.

Le modèle de l'aéronef étant maintenant défini ainsi que les caractéristiques de l'environnement externe qui lui est appliqué, la résolution des équations de l'équilibre énergétique par bande de fréquences (ici l'octave) permet d'obtenir les niveaux vibratoires sur chacun des éléments du modèle; pression turbulente externe et pression en cabine lors d'un vol à 150 m/s, vibrations fuselage (figure 7). Ce calcul ne prend qu'une fraction de second



Figure 10 : Vues du moteur VULCAIN.

Analyse prévisionnelle SEA d'un véhicule spatial : exemple d'utilisation d'un modèle SEA hybride théorique/expérimental

VULCAIN est le moteur cryogénique du corps central du lanceur européen Ariane 5 (cf. figure 10). La poussée du VULCAIN est de l'ordre de 100 tonnes. Un modèle SEA hybride fut développé pendant la phase de développement du moteur afin de prévoir la charge acoustique générée sur les équipements du moteur par les propulseurs d'appoints à poudre (EAP) durant la phase de décollage. La structure du VULCAIN étant très complexe, une analyse SEA expérimentale fut d'abord conduite pour créer une base de données de facteurs de perte expérimentaux (DLF : Damping Loss Factors), de facteurs de perte par couplage (CLF : Coupling Loss Factors), et densités modales. Ces paramètres sont fondamentaux dans les équations d'équilibre énergétique ainsi que nous l'avons vu précédemment (figure 1).

La première étape de la construction de modèle SEA fut d'analyser le comportement vibratoire large bande par un essai sur le moteur passif (non en fonctionnement). Des données de type fonctions de transfert en fréquence furent acquises en utilisant les méthodes de l'analyse SEA expérimentale afin de générer une base fiable de données de coefficients expérimentaux dans le but de comprendre les échanges énergétiques hautes fréquences au sein des différents composants. Cette base de données fut créée à partir d'un modèle expérimental du moteur composé de 16 éléments (sous-systèmes).

Les différents sous-systèmes furent excités par impact et répartis sur les organes moteurs, 135 accéléromètres

permièrent la cartographie du champ vibratoire. Cette collecte d'information fut effectuée par le laboratoire d'essais de IABG à Ottobrunn (Allemagne), le plan d'essais étant sous notre responsabilité et celle de la SEP qui est le maître d'œuvre du projet VULCAIN. Les données furent ensuite traitées sur un ordinateur de type PC par le logiciel de SEA expérimentale EARTHS qui constitue maintenant le noyau du logiciel de SEA expérimentale AutoSEA-X. En sortie de ce traitement furent obtenus les facteurs de perte et de couplage expérimentaux des différents composants moteur.

On peut voir sur la figure 12, les grandes différences de valeurs pour les différents DLF moteur. Ainsi que nous l'attendions, les valeurs des DLF les plus importantes (systèmes les plus dissipatifs) sont obtenus sur les turbo-pompes hydrogène et oxygène (TPO2 et TPH) qui dissipent de l'énergie au travers des nombreux paliers et pièces tournantes. Quelques valeurs de coefficients de couplage sont données sur la figure 13 : divergent, générateur de gaz ligne d'échappement d'oxygène.

Ces couplages, supposés représentatifs des transferts d'énergie lorsque le VULCAIN est attaqué par la pression acoustique des EAP au décollage, furent hybridés avec des coefficients obtenus par modélisation analytique des autres composants non testés dans un modèle SEA général du moteur permettant de prévoir les vibrations induites par un chargement acoustique du VULCAIN au décollage. Des comparaisons furent ensuite conduites entre les résultats du modèle prévisionnel hybride SEA et des mesures d'accélération sur les composants moteur provenant d'essais du moteur passif en chambre réverbérante (cf. figure 15, figure 16).

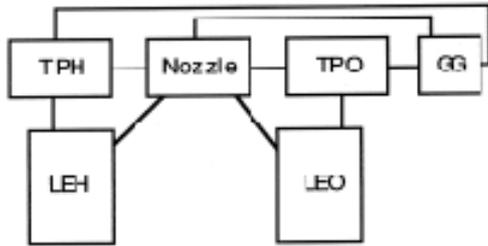


Figure 11 : Modèle optimal résultant des essais d'impact pour le calcul des CLF et des DLF.

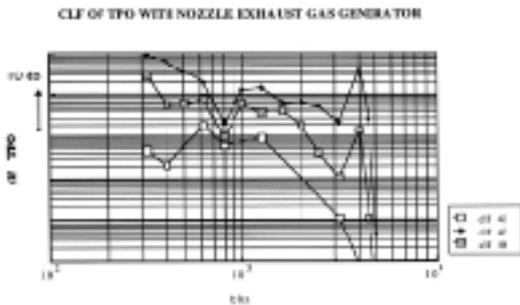


Figure 13 : Facteurs de perte par couplage (CLF) obtenus par SEA expérimentale.

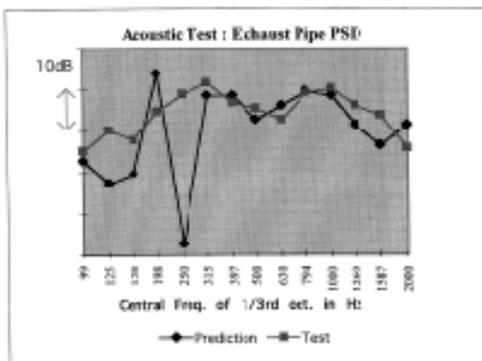


Figure 15 : densité spectrale de puissance (DSP) de la ligne d'échappement mesurée en essais acoustiques en chambre réverbérante et comparée avec la prévision SEA du modèle Vulcain.

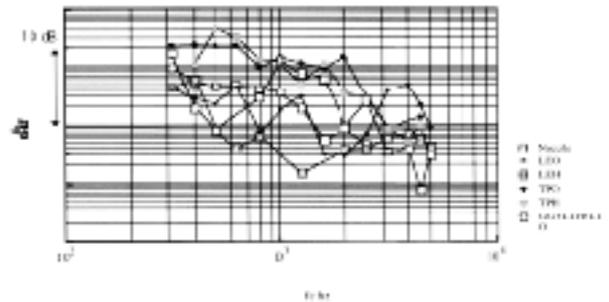


Figure 12 : Facteurs de perte par dissipation (DLF) obtenus par SEA expérimentale.

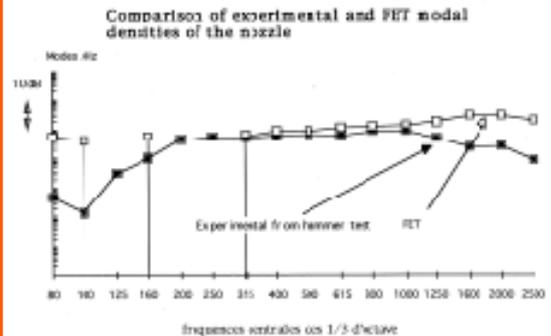


Figure 14 : Densité modale expérimentale du divergent Vulcain comparée avec un résultat issu d'un calcul éléments finis effectué par la SEP.

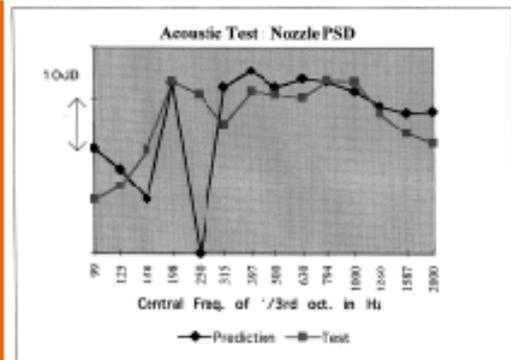


Figure 16 : densité spectrale de puissance (DSP) du divergent mesurée en essais acoustiques en chambre réverbérante et comparée avec la prévision SEA du modèle Vulcain.

Conclusion

Les méthodes prévisionnelles SEA sont un outil puissant d'aide à la conception dans la phase de démarrage d'un projet. Elles permettent de mettre au point les spécifications d'environnement, de tester les solutions d'améliorations possibles de l'environnement acoustique. Dans une phase plus avancée du projet, quand un prototype est disponible pour essais, elles deviennent véritablement prévisionnelles. Les codes SEA dont l'ingénieur peut maintenant disposer bénéficient d'interfaces graphiques élaborées et simples d'utilisation. Les outils analytiques à sa disposition sont plus robustes et permettent d'appréhender le comportement vibratoire d'éléments de plus en plus complexes : plaques et coques sandwich, raidies... Par ailleurs le développement des technologies SEA expérimentales permet maintenant d'accéder par la mesure aux grandeurs analytiques, rendant ainsi la validation des modèles plus aisée. Bien maîtrisées, ces techniques sont le complément hautes

fréquences des techniques de couplage acoustique par éléments finis et présentement le seul moyen fiable d'effectuer des prévisions qui couvrent les moyennes et hautes fréquences du spectre audible

Références bibliographiques

- [1] Lyon, *Statistical Energy Analysis of Dynamical Systems*, MIT, 1975
- [2] G. Borello, *Vibrational energy prediction of the response of the Vulcain Rocket engine using a mixed FET/SEA analysis*, INTER_NOISE 1992, Toronto
- [3] A. Kernilis et R. Gazave (SEP), G. Borello (InterAC), P. Esparcieux (Vibria), *Ambiance vibratoire des moteurs fusées, Colloque international "ambiance acoustique et vibratoire des systèmes de transport spatial"*, 8/11 février 1994, Juy en Josas
- [4] G. Alonso et M. Klein (ESTEC), G. Borello (InterAC), *Vibroacoustic analysis of a manned spacecraft using SEA*, NOISE-CON 94, 1/4 May 1997, Fort Lauderdale, Floride
- [5] AutoSEA, *User's guide version 1.5*, 1997 by Vibro Acoustic Sciences Ltd (VASL)