



HAL
open science

Analyse vibroacoustique des lanceurs

Bernard Troclet, Bastien Hiverniau, Mohamed Ichchou, Louis Jézéquel

► **To cite this version:**

Bernard Troclet, Bastien Hiverniau, Mohamed Ichchou, Louis Jézéquel. Analyse vibroacoustique des lanceurs. 8e Colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2007, Giens, France. hal-01495790

HAL Id: hal-01495790

<https://hal.science/hal-01495790v1>

Submitted on 26 Mar 2017

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

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

Public Domain

Analyse vibroacoustique des lanceurs

Bernard Troclet* — **Bastien Hiverniau*** — **Mohammed Ichchou****
Louis Jézéquel**

* *EADS ASTRIUM ST*

Dépt. TE35, 66 route de Verneuil, 78133 Les Mureaux cedex BP 3002

bernard.troclet@space.eads.net, bastien.hiverniau@space.eads.net

** *Laboratoire de Tribologie et Dynamique, Ecole Centrale de Lyon*

36, avenue de Collongue, 69134 Ecully

mohammed.ichchou@ec-lyon.fr, louis.jezequel@ec-lyon.fr

RÉSUMÉ. Les lanceurs sont soumis au décollage et en vol à un environnement acoustique et aéroacoustique. Cet environnement, aléatoire, couvre un large domaine fréquentiel, des basses aux hautes fréquences. Les équipements électroniques et les satellites sont, en conséquence, excités et les vibrations induites doivent être prédites, afin de s'assurer avant vol, qu'ils ne seront pas endommagés.

Il est donc important de disposer d'une méthodologie de prévision couvrant tout le domaine fréquentiel. Ce papier présente la méthodologie générale, particulièrement en moyennes et hautes fréquences, développée à EADS ASTRIUM ST, ainsi qu'une validation industrielle.

ABSTRACT. The launch vehicles are subjected at lift-off and during flight ascent to a severe acoustic and aeroacoustic environment. This environment is broadband and random. Electronic equipment and satellites are consequently excited and the induced vibrations must be predicted before flights, in order to be sure that they can endure the induced loads without any damage. It is essential to have numerical vibroacoustic tools in all frequency ranges of concern, in the low, mid and high frequency regimes.

This paper presents the general methodology, particularly in mid and high frequency ranges developed at EADS ASTRIUM ST and an industrial validation of this methodology.

MOTS-CLÉS: vibroacoustique, méthodes hybrides, éléments finis, SEA, SEA-Like

KEYWORDS: vibroacoustics, hybrid methods, finite elements, SEA, SEA-Like

1. Introduction

Des charges large bande variées sont appliquées aux lanceurs, comme les charges acoustiques dues aux moteurs de fusée au décollage, et les charges aéroacoustiques dues à l'écoulement aérodynamique le long des structures lors des phases transsonique et de pression dynamique maximale. Ces excitations sont aléatoires. L'environnement acoustique et vibratoire induit peut endommager les équipements électroniques et les satellites.

Par conséquent, il est important de disposer d'outils numériques permettant la prévision de la réponse vibroacoustique des lanceurs dans tout le domaine fréquentiel d'intérêt, basse, moyenne et haute fréquence, de 20 à 2000 Hz. Sachant qu'une grande variété d'excitations acoustiques doit être prise en compte : le bruit de décollage est très proche du bruit diffus, le bruit aérodynamique a des fonctions de corrélation particulières, les approches doivent également être adaptées à ce type de bruit.

Ce papier présente les méthodologies employées pour chaque bande de fréquence considérée et des validations industrielles.

2. Approche générale

L'analyse de la réponse d'une structure à une excitation large bande met en évidence trois régimes fréquentiels : le régime basse fréquence caractérisé par un nombre discret de modes structuraux et acoustiques bien séparés, qui apparaissent à des fréquences caractéristiques particulières. Quand la fréquence augmente, les modes tendent à se recouvrir, et il devient difficile de les séparer. La densité modale est alors élevée. Nous sommes alors dans le régime haute fréquence. En théorie, le régime haute fréquence est atteint lorsque le critère de recouvrement modal défini par $n\eta\omega$, avec n la densité modale, η facteur de perte par dissipation de la structure ou cavité, et ω la pulsation de la fréquence considérée, est supérieur à 1. A contrario, le régime basse fréquence est caractérisé par un recouvrement modal faible, très inférieur à 1. Il existe une zone fréquentielle intermédiaire, où les modes ne sont plus parfaitement séparés et commencent à se recouvrir. C'est la zone moyenne fréquence. En conséquence, trois méthodes prévisionnelles adaptées à chaque régime fréquentielle sont nécessaires.

A hautes fréquences, l'Analyse Statistique Energétique SEA est utilisée, (Lyon, 1984). A basses fréquences, caractérisées par une densité modale faible, l'Analyse Statistique Energétique SEA n'est pas justifiée. L'un des intérêts de la méthode SEA est qu'elle fournit les transferts énergétiques entre les structures et les cavités. D'autre part, les excitations rencontrées sont aléatoires. Une vision énergétique est donc parfaitement adaptée à la problématique des lanceurs. Aussi, l'approche pour prédire la réponse vibroacoustique en basses fréquences s'appuie sur le concept de flux de puissance. Elle est présentée dans la référence (Trochet *et al.*, 1997).

En moyennes fréquences, la méthode énergétique SEA-Like, (Mace, 2005), qui prolonge la méthode SEA est développée.

Un point important est que, étant donné la puissance des ordinateurs actuels, il est possible de combiner la méthode par éléments finis et la méthode SEA ou SEA-Like, afin de combler certains manques de ces méthodes, comme le calcul des transmissions solidiennes. Aussi, une démarche hybride est développée à EADS ASTRIUM ST.

3. Prévision dans le domaine hautes fréquences

La caractérisation du comportement vibratoire d'une structure dans le domaine haute fréquence est souvent obtenue en utilisant des méthodes énergétiques comme l'Analyse Statistique  nerg etique SEA. La méthode consiste à diviser la configuration structurale considérée en sous systèmes, afin de calculer leur énergie totale moyennée dans l'espace et dans le temps. L'écriture de l'équation de l'énergie permet d'obtenir un système matriciel qui exprime que la somme de la puissance dissipée dans un sous système donn e et des puissances échangées avec les autres sous systèmes est égale à la puissance fournie par les forces externes. Un point important est de définir un modèle SEA correct. Du point de vue pris dans cet article, un modèle SEA correct doit satisfaire particulièrement les conditions suivantes :

- Le critère de recouvrement modal doit être satisfait,
- Il n'y a pas de couplage entre des sous systèmes non directement connect es,
- La condition de couplage faible doit être satisfaite.

L'écriture de l'équation de conservation de l'énergie entre les sous systèmes peut s'écrire en fonction du facteur de perte par dissipation η_{id} de chaque sous système i , des coefficients de perte par couplage $\eta_{i,j}$, entre les sous systèmes i et j , et de la densité modale de chacun des sous systèmes i , n_i , comme suit :

$$\begin{bmatrix} \eta_{1tot} & -\eta_{12} & \dots & -\eta_{1n} \\ -\eta_{21} & \eta_{2tot} & \dots & -\eta_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\eta_{n1} & -\eta_{n2} & \dots & \eta_{ntot} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 / n_1 \\ E_2 / n_2 \\ \vdots \\ E_n / n_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{1,inj} / n_1 \omega \\ P_{2,inj} / n_2 \omega \\ \vdots \\ P_{3,inj} / n_n \omega \end{bmatrix} \quad [1]$$

avec E_i énergie totale du sous système i , $P_{i, inj}$, puissance injectée par les forces extérieures au sous système i , ω la pulsation, et $\eta_{i, tot}$, le facteur de perte total tel que :

$$\eta_{itot} = \eta_{ii} + \sum_{i \neq j} \eta_{ij} \quad [2]$$

Les puissances injectées sont supposées connues, bien qu'il ne soit pas toujours ais e de les caractériser. Les facteurs de perte par dissipation sont fournis par l'expérience ou des bases de données. Une difficulté est la détermination des coefficients de couplage entre structures, notamment quand les connections sont complexes. Des méthodes alternatives sont donc nécessaires. Deux méthodes sont envisagées : la méthode de la puissance injectée PIM, pour les hautes fréquences, et l'approche SEA-Like pour les moyennes fréquences.

3. Méthode de l'injection de puissance PIM

Dans le cas de structures complexes, les coefficients de couplage sont déterminés expérimentalement. L'idée est d'utiliser la modélisation par éléments finis EF, afin d'obtenir ces coefficients de couplage. Cette démarche, qui consiste à déterminer les paramètres SEA nécessaires aux calculs SEA, est appelée méthode hybride EF/SEA. Considérons une configuration structurale composée de n sous systèmes, dont un modèle éléments finis a été réalisé. La méthode PIM consiste à exciter numériquement les sous systèmes du modèle éléments finis un par un par des forces connues décorréélées dans le temps et dans l'espace (excitation 'rain on the roof'). Les énergies totales des sous systèmes, moyennées dans le temps et dans l'espace, sont obtenues par le calcul éléments finis. Désignons par P_i la puissance injectée au sous système i et par E_{ji} l'énergie totale du sous système j lorsque le sous système i est excité. Normalisons l'énergie totale de la façon suivante :

$$\langle E_{ij} \rangle = E_{ij} / P_j \quad [3]$$

L'excitation des $n-1$ autres sous systèmes conduit à écrire une relation matricielle permettant de déterminer les coefficients de couplage:

$$\begin{bmatrix} \sum \eta_{li} & -\eta_{21} & \dots & -\eta_{n1} \\ -\eta_{12} & \sum \eta_{2i} & \dots & -\eta_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ -\eta_{1n} & -\eta_{2n} & \dots & \sum \eta_{ni} \end{bmatrix} = \frac{1}{\omega} \begin{bmatrix} \langle E_{11} \rangle & \langle E_{12} \rangle & & \langle E_{1n} \rangle \\ \langle E_{21} \rangle & \langle E_{22} \rangle & & \\ & & \langle E_{kk} \rangle & \\ \langle E_{n1} \rangle & & & \langle E_{nn} \rangle \end{bmatrix}^{-1} \quad [4]$$

Ce système matriciel peut s'écrire sous une forme simplifiée :

$$[\eta] = \frac{1}{\omega} [\langle E \rangle]^{-1} \quad [5]$$

L'inversion d'une telle matrice peut conduire à des difficultés numériques dues au mauvais conditionnement matriciel, et à des résultats non physiques. Si l'on revient aux principales hypothèses requises pour un modèle SEA correct, les transmissions par les couplages indirects ne sont pas présentes. Dans ces conditions, les calculs se simplifient et l'expression des coefficients de couplage entre deux sous-systèmes, en considérant l'hypothèse de couplage faible ($\langle E_{ij} \rangle \ll \langle E_{jj} \rangle$), se met sous la forme,

$$\eta_{ij} = \frac{1}{\omega} \frac{\langle E_{ji} \rangle}{\langle E_{ii} \rangle \langle E_{jj} \rangle} \quad [6]$$

L'expression précédente permet de ne pas effectuer d'inversion matricielle et d'obtenir directement les coefficients de couplage entre deux sous-systèmes.

4. L'approche SEA-Like

Dans l'approche SEA-Like retenue à EADS ASTRIUM ST, les sous systèmes sont les mêmes que pour le modèle haute fréquence. Ces sous systèmes sont inclus dans un modèle par éléments finis et la réponse forcée de ce système complet est analysée. En moyennes fréquences, les conditions requises pour un modèle SEA correct ne sont plus satisfaites, car des couplages indirects entre structures non connectées existent et les coefficients de couplage, au sens SEA du terme, dépendent fortement de l'amortissement. Cependant, dans ce cas, une approche hybride combinant les éléments finis et une approche de type SEA peut être mise en œuvre, (Fredö, 1995) et (Mace, 2005). Dans cette approche, l'énergie totale des sous systèmes est reliée aux puissances injectées par la relation :

$$[E] = [A][P] \quad [7]$$

où $[E]$ désigne la matrice colonne des énergies totales, $[P]$ la matrice colonne des puissances injectées. $[A]$ est une matrice composée de coefficients appelés coefficients d'influence, A_{ij} . L'excitation des sous systèmes un par un, dans une démarche analogue à la méthode PIM, permet d'exprimer directement les coefficients de la matrice $[A]$ à partir des énergies normalisées. A hautes fréquences, les approches PIM et SEA-Like doivent converger, si bien que :

$$[A] = \frac{1}{\omega} [\eta]^{-1} \quad [8]$$

Comme pour la méthode PIM, les efforts appliqués dans le modèle numérique sont spatialement décorrélés. Afin de permettre la prise en compte d'excitations réelles spatialement corrélées, rencontrées dans l'industrie spatiale, un modèle d'excitation '*rain on the roof*' équivalente a été développé (Hiverniau, 2006).

5. Application à un cas industriel

Ces deux approches ont été appliquées au SYLDA 5, cf. figure 1, et la convergence des deux méthodes vérifiée numériquement. Un modèle énergétique du SYLDA composé de trois sous systèmes (SEA/PIM et SEA-Like), figure 2, a été réalisé.

A titre d'exemple, nous présentons la comparaison des transferts énergétiques entre les sous systèmes 2 (partie cylindrique du SYLDA) et 3 (cône supérieur) calculés par les deux approches, exprimés sous la forme du coefficient d'influence. Nous observons une convergence des résultats à hautes fréquences.

6. Conclusion

Une démarche hybride combinant les calculs par éléments finis et les méthodes énergétiques SEA (hautes fréquences) et SEA-Like (moyennes fréquences) a été mise en place à EADS ASTRIUM ST.

L'accent a été porté dans un premier temps sur les transmissions solidiennes. La convergence de ces deux méthodes à hautes fréquences a été vérifiée. Les travaux futurs incluront le développement d'une méthodologie de calcul des transferts structures fluide en moyennes fréquences.



Figure 1. *Structure SYLDA*

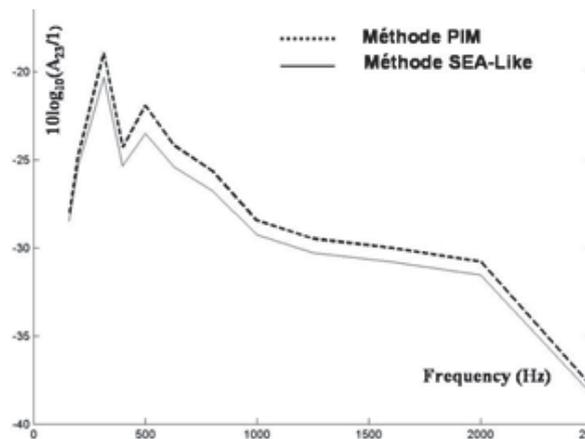


Figure 2. *Convergence des méthodes PIM et SEA-like*

12. Bibliographie

Fredö C. R., Statistical Energy Analysis and the individual case, Phd Thesis, Chalmers University of technology, Göteborg. 1995.

Hiverniau B., Troclet B., Ichchou M. N., Jézéquel L., « Development of Hybrid FEM/SEA Methods for Vibroacoustic Mid and High Frequency Predictions for Aeroacoustic Excitations », *Actes du 9^e International Conference on recent Advances in Structural Dynamics, Southampton, 2006.*

Hiverniau B., Transmissions solidiennes: méthodologie de prévision vibroacoustique moyennes et hautes fréquences sous excitations aéroacoustiques, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 2006.

Lyon R. H., Statistical Energy Analysis of dynamic systems, MIT press, 1984.

Mace B. R., « Statistical Energy Analysis: coupling loss factors, indirect coupling and system modes », *J. Sound Vib.*, vol. 279, 2005, p. 141-170.

Troclet B., Mathieu N., Rivière P., Schott M. O., Ravier C., « Low and high frequency prediction of the vibroacoustic response of launch vehicles and aircrafts », *New advances in modal synthesis of large structures, Jézéquel (ed), Rotterdam, Balkema, 1997, p. 279-290.*

Troclet B., Hiverniau B., Kayvantash K., Bekkour T., « Development of FEM/SEA hybrid methods for vibroacoustic mid frequency predictions », *Actes du 6^e International Symposium on Launchers Technolog, Munich, 2005.*