PROBLÈMES VIBROACOUSTIQUES DES LANCEURS SPATIAUX

H.J.-P. Morand

▶ **To cite this version:**

H.J.-P. Morand. PROBLÈMES VIBROACOUSTIQUES DES LANCEURS SPATIAUX. Journal de Physique Colloques, 1990, 51 (C2), pp.C2-1123-C2-1127. 10.1051/jphyscol:19902263 . jpa-00230594

HAL Id: jpa-00230594
https://hal.science/jpa-00230594

Submitted on 4 Feb 2008

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.

COLLOQUE DE PHYSIQUE
Colloque C2, supplément au n°2, Tome 51, Février 1990 C2-1123

1er Congrès Français d'Acoustique 1990

PROBLÈMES VIBROACOUSTIQUES DES LANCEURS SPATIAUX

H.J.-P. MORAND

Direction des Lanceurs, CNES, F-91023 Evry, France

Résumé : nous présentons les moyens actuellement mis en oeuvre dans le cadre du programme Ariane, et les actions de recherches entreprises, afin d'identifier les sources acoustiques et prévoir les niveaux vibroacoustiques induits sur le lanceur.

Abstract : we present the means presently used within the Ariane program, and research actions undertaken, in order to assess the external acoustic sources, and evaluate the vibroacoustic environment induced on the launcher.

1 - INTRODUCTION

Durant la phase de vol atmosphérique, un lanceur de satellites est soumis à un environnement vibratoire d'origine aéro-acoustique intense, susceptible de perturber le fonctionnement des équipements du lanceur et d'endommager la charge utile.
La figure 1 représente l'évolution en fonction du temps, d'un niveau de vibration enregistré dans la case à équipements au cours du vol du premier étage d'un vol d'Ariane 4.
On note trois phases distinctes [1].

Au décollage,
le bruit provient principalement du mélange des gaz ejectés à grande vitesse (> Mach 3) avec l'air ambiant: la puissance émise est de l'ordre de 0,1% de la puissance des moteurs fusées, environ 20 MW - soit 183 dB - dans le cas d'Ariane 5.
Ce bruit est maximal au voisinage de la baie de propulsion. Au décollage il est renforcé par la déflexion des jets par les carneaux, qui rend les sources acoustiques "visibles" de la partie haute, tandis que pendant le vol de croisière, elles sont en quelque sorte "masquées" par le lanceur: c'est la raison des niveaux élevés mesurés pendant les 20 premières secondes de vol (pouvant dépasser 145 dB sur la paroi externe de la coiffe).

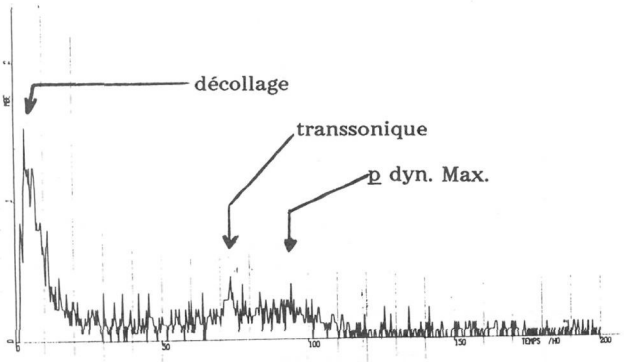

Fig 1 - vibrations case à équipements
(Ariane 4, vol 27)

Aux vitesses transsoniques,
l'excitation des structures du lanceur provient des phénomènes aérodynamiques instationnaires complexes qui accompagnent l'apparition d'ondes de chocs (interaction ondes de chocs-couche limite, décollements).

Au passage de la pression dynamique maximale,
c'est la turbulence de la couche limite qui explique la présence du 2ème pic.

L'acoustique, d'actualité...
L'acuité de ces problèmes tend à s'accroitre pour les lanceurs futurs, pour les raisons suivantes:
- l'augmentation de la poussée au décollage et donc de la puissance acoustique globale émise,
- l'accroissement de la pression dynamique en régime transsonique (qui passe de 20 000 Pa pour Ariane 4, à 40 000 Pa pour Ariane 5),
- l'emploi de plus en plus fréquent de matériaux composites légers à base de fibres de carbone - notamment pour la coiffe qui contient la charge utile - qui tend à rendre les structures acoustiquement plus "transparentes".
- Enfin le maintien de la compétitivité du lanceur face aux concurrents fait de la maîtrise de l'environnement de la charge utile un véritable enjeu commercial.

La détermination des charges vibroacoustiques
s'appuie actuellement sur un ensemble d'essais et de calculs que nous présentons dans ce qui suit.
Parallèlement à la mise en oeuvre de ces actions propres à chaque projet, le CNES - en concertation ou en association avec les principaux industriels ou organismes de recherches spatiaux concernés - soutient un effort d'investissement important dans ce domaine, dont nous nous proposons de dégager les axes principaux.

Article published online by EDP Sciences and available at http://dx.doi.org/10.1051/jphyscol:19902263

1. L'ENVIRONNEMENT ACOUSTIQUE EXTERNE.

Des essais à feu d'une fusée miniature...
L'environnement acoustique au décollage est déterminé au moyen d'essais sur maquette au 1/20ème du lanceur et de l'aire de lancement (Fig 2). La mise à feu de moteurs-fusées miniatures, fonctionnant avec la même pression foyer que les moteurs réels, permet de reproduire à l'échelle, pendant une seconde environ, le champ acoustique réel: en des points semblables, les niveaux sont identiques, et les fréquences multipliées par 20.
L' exploitation de ces essais permet ensuite de localiser et de mesurer l'intensité de sources réparties le long du jet, en se référant à des règles semi-empiriques tirées de la documentation américaine (fréquences prédominantes et directivité des sources acoustiques en fonction de leur position sur la ligne moyenne du jet).
On parvient ainsi pour chaque altitude, à une représentation satisfaisante du champ acoustique émis par des jets simplement défléchis par les carneaux.

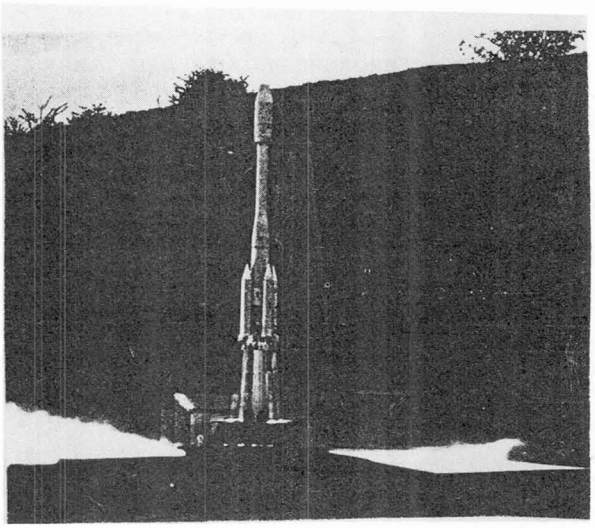

Fig. 2 - Essais maquette 1/20ème (ONERA, Fauga)

Des essais sur maquette en soufflerie...
permettent, enfin, de mesurer les fluctuations "acoustiques" d'origine aérodynamique.

2. PREVISION VIBROACOUSTIQUE.

Prévoir le bruit et les vibrations...
Les études vibroacoustiques ont pour objectif la prévision, de 50 à 2000 Hz, des niveaux vibratoires engendrés dans les structures du lanceur au pied des équipements, ainsi que les niveaux acoustiques dans les différents compartiments, particulièrement au niveau de la charge utile.
Ces données permettent de définir les spécifications d'essais de qualification des équipements du lanceur et des charges utiles (vibrations aléatoires, essais en chambre réverbérante), ou de décider la mise en oeuvre éventuelle de moyens d'atténuation du bruit au cas où ces niveaux sortiraient de limites raisonnables (définis en particulier par rapport aux lanceurs concurrents pour ce qui concerne les charges utiles).

Le problème couplé vibroacoustique:
En première approximation, la prévision vibroacoustique équivaut, pour un champ acoustique incident donné, à la résolution de problèmes stationnaires (tridimensionnels) couplés d'acoustique et de réponse vibratoire de structures. (propagation acoustique en présence des obstacles extérieurs, interaction avec les structures élastiques du lanceur et transmission dans les cavités acoustiques internes).

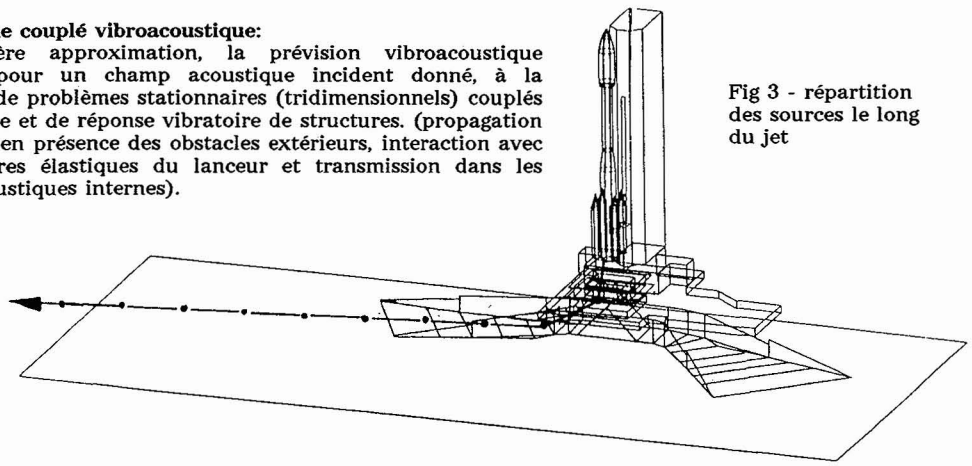

Fig 3 - répartition des sources le long du jet

Un champ acoustique équivalent...
Dans le cas présent, où les sources acoustiques sont situées à l'extérieur des structures du lanceur, les sources acoustiques "réelles" peuvent être remplacées par un champ acoustique "équivalent" (produisant les mêmes effets sur le lanceur) agissant à la paroi du lanceur, qui n'est autre que le champ acoustique du aux sources réelles, calculé à la paroi dans l'hypothèse d'une structure rigide.
le problème vibroacoustique posé équivaut donc formellement au **"problème intérieur"** de la réponse de structures élastiques contenant des fluides à des forces équivalentes aléatoires, couplé au **"problème extérieur"** de rayonnement acoustique de la structure.

Le problème élasto-acoustique "intérieur"

Aux basses fréquences, ce problème peut être traité par les méthodes "classiques" de résolution des problèmes d'interaction vibratoire fluide structure, utilisés pour l'étude vibratoire des lanceurs à liquides (prévention des instabilités pogo par exemple).

En premier lieu, la méthode des éléments finis qui conduit à un problème matriciel, ou à un "problème réduit" de résolution en base modale "élasto-acoustique" du problème initial [2].

Ce type de méthode est implantée (ou en voie de l'être) dans la plupart des codes généraux d'éléments finis.

Cette approximation "intérieure" est acceptable lorsque l'énergie dissipée par rayonnement est négligeable, ou assimilable à un amortissement structural. Elle a été utilisée à l'ONERA [3] pour l'étude de la réponse vibroacoustique de la case et de la coiffe d'Ariane 4 (fig 4).

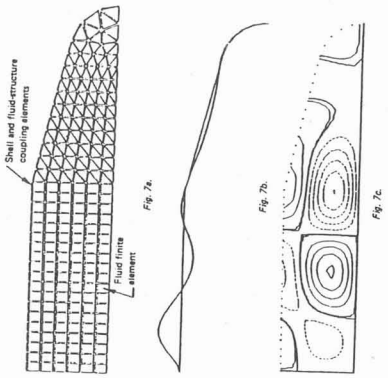

Fig 4 - Calcul éléments finis (ONERA)

Cette approche conduit également à un schéma de couplage modal utilisant des modes "élastiques" et les modes "acoustiques" calculés pour une cavité rigide. Le problème de réponse est ramené ainsi à un système d'équations différentielles (écrites ici sans effet de dissipation et de rayonnement).

$$\begin{bmatrix} Diag_K(\lambda_{el}) & 0 \\ 0 & Diag_N(\lambda_{ac}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_{el} \\ Q_{ac} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_K & C \\ C^T & I_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{Q}_{el} \\ \ddot{Q}_{ac} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi(t) \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C_{i\,\alpha} = \frac{1}{\omega_{ac}^2 \sqrt{\mu_{ac}^{(\alpha)}} \sqrt{\mu_{el}^{(i)}}} \int_{\Sigma_{int}} p_{ac}^{(\alpha)} u_{el}^{(i)}.n \qquad \varphi^{(i)}(t) = \int_{\Sigma_{ext}} F_{ext}(x,t) \frac{u_{el}^{(i)}}{\sqrt{\mu_{el}^{(i)}}}$$

avec: $Q_{el} = \{q_{el}^{(i)}; i = 1, K\}$, $Q_{ac} = \{q_{ac}^{(\alpha)}; \alpha = 1, N\}$ coordonnées généralisées "normalisées"élastiques et acoustiques; I matrices unités; $\lambda = \omega^2$; ω_α pulsation, $p_{ac}^{(\alpha)}$ pression à la paroi interne Σ_{int}, $\mu_{ac}^{(\alpha)}$ masse généralisée acoustique; $u_{el}^{(i)}.n$ déplacement normal et $\mu_{el}^{(i)}$ masse généralisée élastique. $C_{i\,\alpha}$ est un facteur de couplage élastoacoustique sans dimension, et $\varphi^{(i)}$ mesure l'excitabilité du mode élastique aux forces appliquées extérieures.

Subdiviser les structures et les cavités acoustiques...

Enfin la procédure de sous-structuration peut être poursuivie à une échelle inférieure, en substituant aux coordonnées modales globales de la structure et du fluide des coordonnées correspondant à des modes de "sous-domaines" acoustiques et structuraux, définis pour des conditions aux limites spécifiées à la frontière avec les sous-domaines voisins.

Ce processus de condensation peut nécessiter l'introduction d'inconnues de frontière supplémentaires, qui, sous certaines conditions peuvent être éliminées,ce qui introduit des termes de couplages supplémentaires entre les coordonnées correspondant aux divers sous-domaines.

On aboutit ainsi à un système d'équations différentielles couplées semblable au système précédent, équivalent, aux erreurs de troncature près, au problème initial.

Le Problème élasto-acoustique "extérieur".

La prise en compte "exacte" du couplage avec les fluides extérieurs a suscité des développements importants au cours de ces dernières années [4][5].

La plupart des méthodes reposent sur une représentation intégrale du champ de pression dans les domaines fluides (intérieurs et extérieurs) en fonction de singularités distribuées sur les parois (sauts de pression et de sa discontinuité normale dans [4]).

Ce type de méthode conduit à la résolution, pour chaque fréquence, d'un système d'équations linaires complexes. Les réponses "élémentaires" ainsi calculées pour chaque source ponctuelle, doivent ensuite être combinées en chaque point, puis moyennées fréquentiellement et éventuellement spatialement pour être comparées aux spécifications d'environnement acoustique ou aux résultats de mesure.

Cette méthode a été appliquée avec succès à la prévision de l'ambiance vibroacoustique de la partie haute lors du premier vol d'Ariane 4 (Fig 5). Elle a également été appliquée pour l'évaluation de la réduction des niveaux acoustiques sous coiffe apportée par un remplissage en hélium et l'exploitation d'essais sur des cylindres en matériaux composites réalisés à l'ISVR (Institute of Sound and Vibration Research, Southampton)

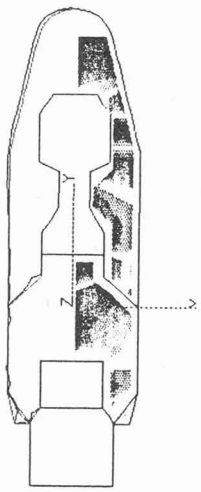

Fig 5 - Prévision Ariane 4

Les modèles statistiques énergétiques "SEA".
Aux fréquences élevées, la voie des techniques "basses fréquences" devient impraticable, les densités modales devenant trop importantes.
Cette situation explique l'attrait des méthodes d'analyse statistique énergétique visant, *ab initio*, la détermination de quantités moyennes, et dont le fondement repose principalement sur le résultat suivant (exact): la puissance vibratoire moyenne échangée entre deux résonateurs couplés soumis à des forces aléatoires non corrélées, est proportionnelle à la différence des énergies vibratoires moyennes de chaque oscillateur.
L'analyse statistique énergétique (SEA) revient à transposer ce résultat, dans une bande de fréquence donnée, au flux d'énergie vibratoire échangé entre chaque "sous-domaine" d'un système complexe, moyennant, en outre certaines restrictions, notamment sur le champ acoustique incident (excitations aléatoires réparties assimilables à un bruit diffus) [6]:

$$\omega \begin{bmatrix} (\eta_1 + \sum_{i\neq 1}^{k} \eta_{1i}) n_1 & -\eta_{11} n_1 & \dots & -\eta_{1k} n_1 \\ -\eta_{21} n_2 & (\eta_2 + \sum_{i\neq 2}^{k} \eta_{2i}) n_2 & \dots & -\eta_{2k} n_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\eta_{k1} n_k & -\eta_{k2} n_k & \dots & (\eta_k + \sum_{i\neq k}^{k} \eta_{ki}) n_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{E}_1/n_1 \\ \bar{E}_2/n_2 \\ \vdots \\ \bar{E}_k/n_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{P}_1 \\ \bar{P}_2 \\ \vdots \\ \bar{P}_k \end{bmatrix}$$

avec pour la sous-structure α, n_α = densité modale, $\bar{E}_\alpha$ = énergie moyenne, $\bar{P}_\alpha$ = puissance injectée, η_α = facteur de dissipation, et $\eta_{\alpha\beta}$ = "facteurs de perte par couplage" ($\eta_{\beta\alpha} = \eta_{\beta\alpha}$).

Un cadre d'analyse pour l'ingénieur...
Cette méthode a le mérite de fournir un cadre "synoptique" commode pour l'analyse des flux d'énergie vibratoire dans un système complexe, en restant peu sensible aux détails du comportement vibratoire local, ce qui la rend utilisable dès le stade préliminaire d'un projet.
Enfin, les facteurs de couplage énergétique estimés analytiquement ou numériquement dans le cas de couplage de sous-systèmes simples, peuvent éventuellement être identifiés expérimentalement.
Cette méthode implantée dans le code LASCAR de l'Aérospatiale a eté appliquée avec succès aux prévisions vibroacoustiques d'Ariane [7].

Des méthodes analytiques simplifiées...
Des méthodes de ce type (développées en géométrie cylindrique) permettent de combler certaines limitations des méthodes BF (leur coût) et HF (prise en compte de champs incidents non diffus). Citons par exemple les travaux effectués à l'INSA de Lyon [8] et à l'ISVR [9] qui ont permis des études paramétriques mettant en évidence des possibilités d'optimisation du facteur de réduction de bruit d'une coiffe (en jouant sur la disposition relative des fréquences d'anneau et des fréquences de coïncidence).
Signalons également l'étude menée au CSTB (Grenoble), au moyen d'un code d'acoustique géométrique, qui a permis d'évaluer les effets de réverbération à proximité de la coiffe au décollage(cf. Fig 3).

Mesurer en acoustique...
La qualité des prévisions vibroacoustiques dépend aujourd'hui directement de la fiabilité des mesures réalisées lors des campagnes de mesures acoustiques sur maquettes motorisées ou d'essais acoustiques d'ensembles structuraux, et de la connaissance des caractéristiques des matériaux et des structures. Une technique originale d'identification du champ environnant la partie haute du lanceur, à partir de mesures réalisées au moyen d'une antenne acoustique sphérique a été développée par le LMA à Marseille; elle doit être mise en oeuvre à l'occasion de la prochaine campagne d'essais d'Ariane 5. Signalons enfin les mesures par intensimétrie acoustique, du coefficient d'absorption et de perte par transmission d'un panneau de coiffe réalisée par le CETIM.

3. OBJECTIFS DE R&T VIBROACOUSTIQUE

Ces objectifs découlent des insatisfactions actuelles concernant la détermination de l'ambiance acoustique externe, et les méthodes de prévision vibroacoustique.

Comprendre les mécanismes de génération du bruit...
En premier lieu, s'il est vrai que le modèle de sources NASA permet une évaluation réaliste de la distribution des sources acoustiques d'un jet "simplement" dévié par un carneau (moyennant un ajustement de la puissance totale émise), il n'existe, à ce jour, aucun modèle permettant de prévoir les sources de "bruit d'interaction" générés par l'impact d'un jet supersonique sur la table de lancement, ou encore l'efficacité de procédures de réduction de bruit par injection d'eau dans les jets, ou par la couverture des carneaux.

... pour réduire les coûts.
La détermination des sources de bruit et la mise au point de moyens de réduction du bruit nécessite actuellement de recourir à des campagnes d'essais coûteuses.
Une meilleure connaissance des lois régissant ces phénomènes permettrait, en orientant le choix des solutions de réduire le nombre d'essais et de réduire les facteurs d'incertitudes liés notamment à la méconnaissance des facteurs d'échelle: c'est l'un des objectifs du programme de recherches sur les mécanismes d'émission acoustique de jets supersoniques chauds actuellement mis en place par le CNES et coordonné par l'ONERA.

Modéliser les couches limites turbulentes ?
Jusqu'à présent, le bruit d'origine aérodynamique ne s'est pas révélé dimensionnant, les structures constituant une protection acoustique efficace contre ces excitations dont l'échelle de corrélation spatiale est courte. Cependant la tendance à l'augmentation des pressions dynamiques en régime transsonique et la mise en oeuvre de procédures de réduction à la source du bruit au décollage, risque à terme, de faire intervenir ces sources d'excitation au premier plan.

Améliorer les outils existants...
En ce qui concerne les méthodes de prévision de la réponse vibroacoustique "basses fréquences", l'objectif est d'augmenter le rapport précision/coût d'utilisation des méthodes actuelles par l'application systématique de techniques de réduction modale modales à la structure et aux fluides internes, l'investigation d'approximations analytiques du problème extérieur, la simulation numérique de conditions aux limites absorbantes transparentes, et la recherche d'algorithmes simplifiés...

La "SEA" en question !
En dehors de cas d'école, il n'existe pas aujourd'hui de dérivation convaincante des méthodes d'analyse statistique énergétique pour les systèmes vibroacoustiques généraux, qui permettrait par exemple d'en fixer précisément les limites d'application, d'apporter éventuellement certaines corrections, ou, pourquoi pas d'en étendre le champ d'application à des champs acoustiques ou des distributions de forces plus généraux.
Il nous apparaît donc nécessaire de rechercher des méthodes "intermédiaires" de résolution approchée du système d'équations différentielles couplées évoquées ci-dessus, pour une classe de chargements extérieurs de spectre fréquentiel suffisamment large, et en prenant en compte des critères adéquats de couplage modal et d'excitabilité par rapport aux forces extérieures .

4 - CONCLUSION

La mise en oeuvre par le CNES, d'un plan de recherches coordonnées par l'ONERA, visant à la compréhension et la modélisation des mécanismes de génération des bruits d'interaction de jets, constitue un investissement essentiel pour les lanceurs spatiaux.
De plus, le CNES et l'Aérospatiale ont décidé de poursuivre leurs efforts de recherches en vibroacoustique, avec pour objectif de développer un logiciel vibroacoustique complet, associé à un ensemble de recherches coordonnées - baptisé "pôle vibroacoustique" - visant à développer l'environnement scientifique dans ce domaine.

5 - REFERENCES

[1] Bec R., Borello G., "Ariane, çà fait du bruit..." Document interne CNES 1986

[2] Morand H.J-P., Ohayon R., *Substructure variational analysis for the vibrations of coupled fluid-structure systems*. Int.J. Num. Meth. Eng. 14, 5 (1979), 741-755.

[3] Ohayon R., Meidinger N., Berger H., *Symmetric variational structural acoustic systems - Aerospace applications*. 23th Structural Dynamics and Materials Conference, Monterey Cal., April 6-8, 1987.

[4] Hamdi M.A., C.R. de l'Académie des Sciences de Paris, Série II, Janvier 1981, 292 (17).

[5] Lesueur C., *Rayonnement acoustique des structures, vibroacoustique , interaction fluide-structure*. Editions Eyrolles 1988, collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France.

[6] White R.G., Walker J.G., *Noise and vibration*. John Wiley & Sons, 1982.

[7] Troclet B., Dang Trong T., Vidal C., *Prediction of the high frequency response of satellites to diffuse acoustic environments*. Proc. of a conf. "Spacecraft structures", CNES, Toulouse, 3-6 Dec. 1985 (ESA SP-238, April 1986).

[8] Blaise A., Lesueur C., Gotteland M., *Sound transmission studies optimisation of light structures (Acoustic optimisation of light weighted aerospace structures)*. INTERNOISE 88, p. 297-300.

[9] Borello G., Pinder J.N., Borchers I.V., *Interior noise control of spacecraft launch vehicles*. To be published.