



HAL
open science

Caracterisation de l'interaction dynamique transitoire d'une structure maître/esclave dans le lanceur Ariane 5

Jessica Philippon, Bing Tie, Denis Aubry

► **To cite this version:**

Jessica Philippon, Bing Tie, Denis Aubry. Caracterisation de l'interaction dynamique transitoire d'une structure maître/esclave dans le lanceur Ariane 5. 10e colloque national en calcul des structures, May 2011, Giens, France. pp.Clé USB. hal-00592888

HAL Id: hal-00592888

<https://hal.science/hal-00592888>

Submitted on 3 May 2011

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.

Caractérisation de l'interaction dynamique transitoire équipement/ACU dans le lanceur Ariane 5

J. Philippon¹, B. Tie¹, D. Aubry¹, P. Roux², B. Troclet³

¹ LMSSMat (CNRS UMR8579), Ecole Centrale Paris, Grande voie des vignes, 92295, Châtenay-Malabry, France, {jessica.philippon, bing.tie, denis.aubry}@ecp.fr

² CNES, Evry, France, {philippe.roux}@cnes.fr

³ EADS-Astrium, Les Mureaux, France, {BERNARD.TROCLET}@space.eads.net

Résumé — Ce travail a pour contexte l'étude de la propagation des ondes de choc d'origine pyrotechnique dans les structures du lanceur Ariane 5. Le but est de développer des modèles numériques fiables et prédictifs de la propagation de ces chocs, car ils peuvent être néfastes pour des équipements et des charges utiles embarquées. On cherche plus particulièrement à étudier l'interaction entre la propagation de chocs dans l'adaptateur de charges utiles de grande taille et le comportement vibratoire d'un équipement électronique de petite taille.

Mots clefs — Propagation d'ondes, chocs pyrotechniques, charges mobiles supersoniques.

1 Introduction

L'adaptateur de charges utiles (ACU) est une large structure conique, de 2 m de diamètre et 1 m de hauteur, composée d'un assemblage de coques composites sandwich en nids d'abeille. Le domaine de fréquence mis en jeu par les découpes pyrotechniques est large, jusqu'à 25kHz. Nous disposons actuellement de modèles homogénéisés équivalents de l'ACU, qui permettent de simuler correctement des phénomènes de propagation des ondes de chocs en hautes fréquences [1]. Nos solveurs dynamiques ont été développés dans le cadre de la méthode de Galerkin espace-temps discontinue en temps, ils sont de puissants outils pour simuler les phénomènes de propagation d'ondes élastiques [2]. Dans cette contribution, nous nous intéressons plus précisément au comportement vibratoire d'un équipement électronique embarqué de faibles dimensions (< 0.3 m), soumis à des tirs pyrotechniques, et à l'influence de la présence de cet équipement sur la propagation des chocs dans l'ACU.

Nous présentons d'abord la méthode de résolution numérique utilisée et ses avantages. Une analyse modale de l'équipement est ensuite considérée pour les premiers modes. Enfin, des simulations numériques de la propagation des ondes dans une plaque simple puis dans un ACU, avec ou sans équipement embarqué, sont comparées pour des domaines fréquentiels en basses fréquences avec des essais de coup de marteau ou en hautes fréquences avec des découpes pyrotechniques.

2 Solveur dynamique adaptatif espace-temps

Dans ce chapitre, on présente brièvement le solveur dynamique utilisé dans ce travail qui est basé sur la formulation à deux champs de la méthode de Galerkin espace-temps discontinue en temps [3].

2.1 Méthode de Galerkin espace-temps discontinue en temps à deux champs

Considérons un domaine espace-temps $S = \Omega \times I$, où Ω est la structure à étudier soumise à des chargements volumique $f(x,t)$ dans Ω et surfacique $g(x,t)$ sur une partie de sa frontière notée Γ_σ , et $I = [0, T]$ est l'intervalle de temps d'observation. La formulation variationnelle de la méthode de Galerkin espace-temps discontinue en temps à deux champs qu'on utilise ici est définie pour deux champs inconnus en déplacement $u(x,t)$ et en vitesse $v(x,t)$. L'intervalle de temps total I est partitionné en N sous-intervalles $I_n = [t_n, t_{n+1}]$, avec $n = 0, \dots, N-1$, $t_0 = 0$ et $t_N = T$, ainsi le domaine espace-temps S est subdivisé en N tranches espace-temps $S_n = \Omega \times I_n$ (FIG. 1).

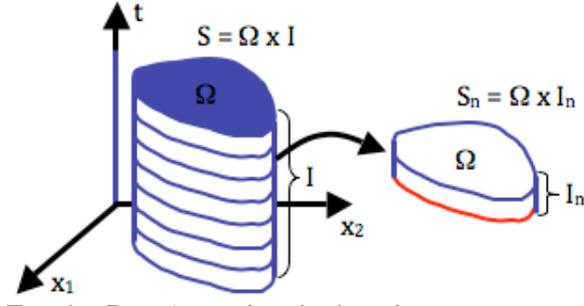


FIG. 1 – Représentation du domaine espace-temps

La formulation variationnelle est construite à partir de deux éléments clés, d'une part la discontinuité en temps des champs de déplacement et de vitesse entre deux tranches espace-temps successives et d'autre part la causalité en temps qui permet de les relier en imposant que les flux entrant sont systématiquement déterminés par les flux sortant de la tranche espace-temps précédente. Ainsi, la formulation variationnelle écrite pour une seule tranche d'espace-temps S_n est la suivante :

$$\begin{aligned} (\rho \partial_t v, w_v)_{S_n} + (\sigma(u), \varepsilon(w_v))_{S_n} + (\rho [v(t_n)], w_v)_{\Omega} &= (f, w_v)_{S_n} + (g, w_v)_{\Gamma_{\sigma} \times I_n} \\ (\sigma(\partial_t u - v), \varepsilon(w_u))_{S_n} + (\sigma([u(t_n)]), w_u)_{\Omega} &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

avec $(\bullet, \bullet)_{S_n}$ l'intégration sur le domaine S_n du produit scalaire ou contracté des deux champs vectoriels ou tensoriels.

Dans cette formulation, la première équation contient des termes classiques qui expriment l'équilibre dynamique de la structure, la deuxième équation est ajoutée pour définir la compatibilité entre le déplacement et la vitesse, et on remarque deux termes non classiques qui permettent de contrôler les sauts en temps du déplacement $[u(t_n)] = u(t_n^+) - u(t_n^-)$ et de la vitesse $[v(t_n)] = v(t_n^+) - v(t_n^-)$ à l'instant t_n .

2.2 Stabilité, amortissement numérique et précision en temps

Le premier avantage de la méthode de Galerkin espace-temps discontinue en temps à deux champs est sa stabilité inconditionnelle. En effet, comme exprimée ci-dessous, l'énergie totale finale, qui est la somme des énergies cinétique $\|v(\bullet)\|_M^2 = (\rho v(\bullet), v(\bullet))_{\Omega}$ et élastique $\|u(\bullet)\|_K^2 = (\sigma(u(\bullet)), \varepsilon(u(\bullet)))_{\Omega}$, est toujours inférieure à celle initialement injectée, la différence entre ces deux termes est l'énergie dissipée par les discontinuités en temps en déplacement et en vitesse :

$$\|v(T^-)\|_M^2 + \|u(T^-)\|_K^2 = \|v(0^-)\|_M^2 + \|u(0^-)\|_K^2 - \frac{1}{2} \left(\sum_{n=1}^{N-1} \| [v(t_n)] \|_M^2 + \| [u(t_n)] \|_K^2 \right) \quad (2)$$

Cette propriété de stabilité, qui est démontrée dans le cadre de la discontinuité en temps du déplacement et de la vitesse, s'avère très utile pour introduire l'adaptativité numérique, car les maillages en espace peuvent être modifiés d'une tranche d'espace-temps à l'autre et la formulation espace-temps reste stable. Ceci nous a permis de développer un solveur dynamique espace-temps adaptatif avec un remaillage adaptatif en espace qui évolue de manière complètement automatique au cours du calcul dynamique en accord avec l'estimation *a posteriori* des erreurs de discrétisation. L'adaptativité numérique peut s'avérer très utile si l'on a des structures de grandes taille à modéliser, car on peut optimiser la taille du modèle numérique tout en contrôlant la qualité des solutions numériques.

Le deuxième avantage de cette méthode est son amortissement numérique, qui est en réalité l'énergie dissipée par les discontinuités en temps. Cet amortissement permet une bonne représentation des fronts d'ondes de choc par le filtrage des bruits numériques à hautes fréquences.

Enfin, notre solveur dynamique possède une précision d'ordre 3 en temps, ce qui permet une assez bonne précision dans la quantification des vitesses et du temps d'arrivée d'ondes.

3 Equipement électronique à analyser

On présente d'abord les données géométriques de l'équipement électronique considéré dans ce travail et les modèles d'éléments finis définis pour son intégration dans les modèles de propagation de l'ACU. Une analyse modale de ces modèles est ici menée pour les premiers modes.

3.1 Description géométrique

L'équipement est composé principalement d'un boîtier externe, de cinq cartes électroniques internes et d'une plaque support des cartes, le tout vissé sur un support qui est une plaque épaisse. La plaque qui sert de support aux cinq cartes électroniques est vissée sur le fond du boîtier au niveau de huit bossages. Les cartes sont reliées en haut entre elles par deux tiges métalliques et chacune des cartes est fixée à la base à la plaque support via des couples d'équerres métalliques. Par la suite, on appellera le module électronique de l'équipement l'ensemble qui est composé des cinq cartes électroniques, de leur plaque support et toutes les fixations (les huit bossages, les deux tiges et les dix équerres).

Les dimensions externes de l'équipement sont de l'ordre de 0,3 m x 0,2 m x 0,15 m. La position relative du boîtier sur son support, ainsi que celle des points de fixation e_1 à e_4 , est donnée en FIG. 2(a). La position relative des cartes électroniques, des équerres et des tiges dans le module électronique est représentée en FIG. 2(b).

Tout l'équipement est composé d'un même alliage d'aluminium, seules les cartes électroniques sont en époxy.

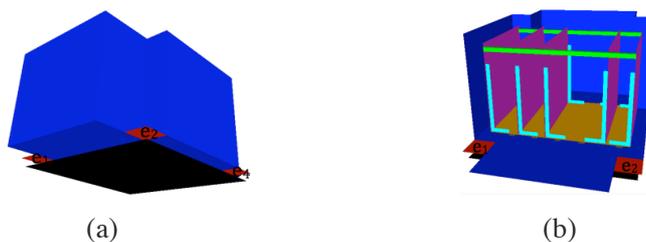


FIG. 2 – Vue externe (a) du boîtier de l'équipement sur son support ;
vue interne (b) du module électronique (e_1 à e_4 points de fixation du boîtier)

3.2 Modèles numériques

Nous réalisons trois modèles d'éléments finis (EF) où les liaisons entre les différentes sous-structures de l'équipement sont définies par des maillages compatibles :

- modèle simplifié M1, composé du boîtier avec une géométrie simple et de son support (FIG. 3 (a),(b)) ;
- modèle simplifié M2, composé du boîtier avec une géométrie réelle et de son support (FIG. 3 (c),(d)) ;
- modèle complet M3, composé du boîtier, du module électronique et de son support (FIG. 3 (e),(f)).

3.3 Analyse modale des différents modèles EF

D'après une analyse modale de ces modèles (TAB. 1), on retrouve les mêmes modes du boîtier pour M1 et M2 mais à des fréquences différentes. Lorsqu'on introduit le module électronique, pour des fréquences supérieures à 400 Hz on observe uniquement les modes du module électronique dans M3.

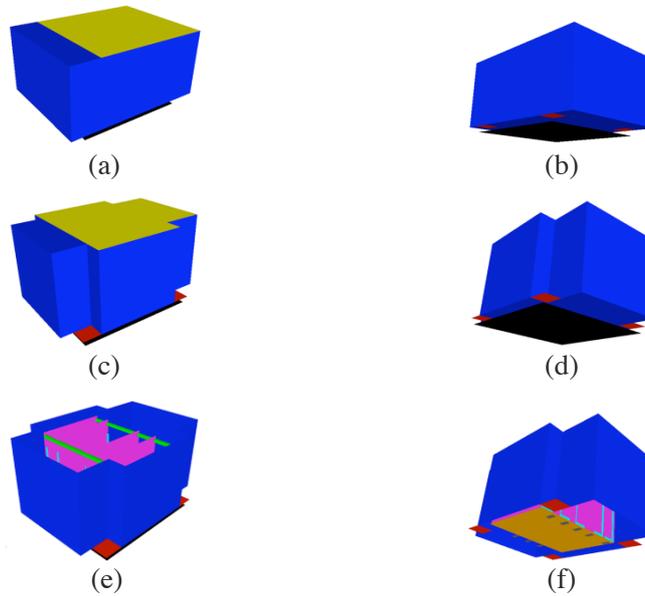
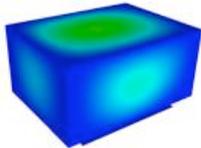
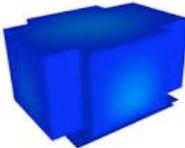
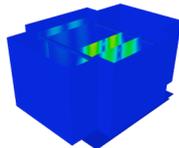
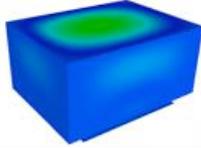
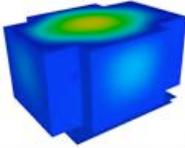
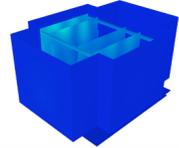
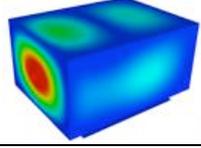
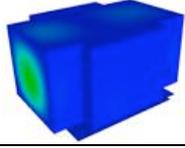
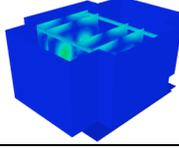
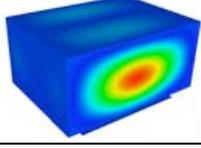
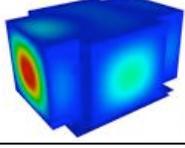
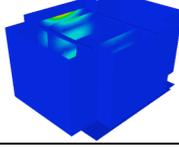
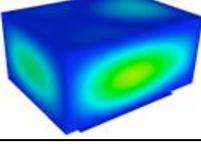
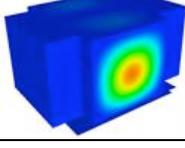
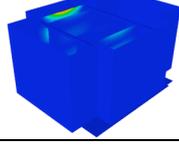


FIG. 3 – Trois modèles d'EF de l'équipement, vue du dessus (gauche) et vue du dessous (droite)

TAB. 1 – Analyse modale des trois différents modèles d'EF de l'équipement

Modèle M1	Modèle M2	Modèle M3
439,4 Hz 	519,6 Hz 	428,3 Hz 
519,7 Hz 	712,8 Hz 	488,1 Hz 
753,3 Hz 	900,6 Hz 	529,9 Hz 
781,4 Hz 	1004,0 Hz 	540,2 Hz 
794,8 Hz 	1019,0 Hz 	540,5 Hz 

4 Influence de la présence de l'équipement sur différentes structures

On compare maintenant des simulations réalisées sur une plaque simple puis sur un ACU, soumis à des chargements en basses fréquences (BF) ou hautes fréquences (HF), avec ou sans cet équipement.

4.1 Paramètres de calcul

Pour paramétrer nos modèles numériques, on définit une taille d'éléments finis en espace, notée h_{min} , et un pas de temps, noté Δt , pour discrétiser le problème élastodynamique. Ces paramètres sont liés à la plus petite longueur d'onde du domaine de fréquence d'intérêt mis en jeu par les chargements dynamiques. Pour correctement représenter la plus petite longueur d'onde λ_{min} , liée à la fréquence de coupure f_c du chargement, on fixe la taille de maille h_{min} telle qu'il y ait au moins 4 EF dans λ_{min} .

La vitesse maximum des ondes de flexion, qui sont dispersives, détermine la valeur de λ_{min} . Soit $c_f(f_c)$ la plus grande vitesse des ondes de flexion sur notre domaine de fréquence, on obtient :

$$h_{min} = \frac{\lambda_{min}}{4} \quad \text{avec} \quad \lambda_{min} = \frac{c_f(f_c)}{f_c} \quad (3)$$

Pour éviter un trop grand amortissement numérique, Δt doit être égal au rapport entre h_{min} et la plus grande vitesse de propagation des ondes à étudier, ici celle des ondes de pression notée c_p :

$$\Delta t = \frac{h_{min}}{c_p} \quad \text{et} \quad \frac{\Delta t}{T_c} = \frac{\lambda_f(f_c)}{4\lambda_p} \quad (4)$$

4.2 Etudes BF et HF d'une plaque simple avec/sans équipement

En premier lieu, on considère une plaque simple en aluminium, de 2 m x 1 m, dite C1. Cette plaque est instrumentée de jauges et d'accéléromètres afin de recueillir des mesures expérimentales de son comportement en membrane et en flexion. L'équipement représenté par son modèle M1 puis M3 est placé sur la plaque C1 à 0,4 m de chacun des deux bords parallèles à l'axe (Ox) et à 0,5 m du bord gauche parallèle à l'axe (Oy) (FIG. 4).

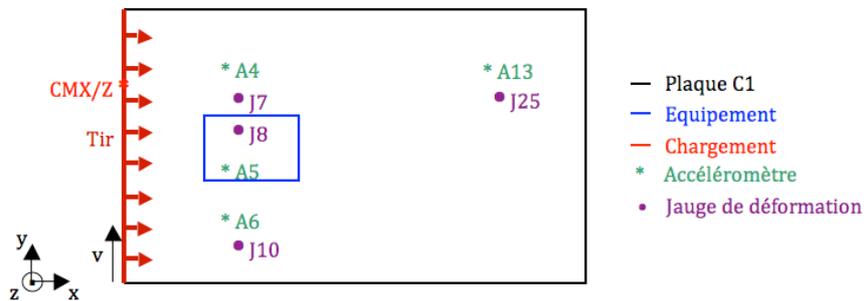


FIG. 4 – Position de l'équipement sur la plaque C1

Pour les études BF, on soumet C1 à des coups de marteaux effectués soit dans une direction tangente à la plaque (noté CMX) soit suivant sa normale (noté CMZ). Le signal synthétique du CMX est une charge longitudinale sollicitant la plaque en compression, appliquée sur le bord gauche parallèle à (Oy) dans la longueur (Ox) de la plaque. Le signal synthétique du CMZ est une charge normale sollicitant la plaque en flexion, appliquée sur le bord gauche parallèle à (Oy) dans l'épaisseur (Oz) de la plaque. La fréquence de coupure de CMX et CMZ est fixée à 10 kHz (FIG. 5).

Pour les études HF, on soumet C1 à un tir de découpe pyrotechnique. Le signal synthétique utilisé pour simuler le tir pyrotechnique possède une composante longitudinale en membrane et une composante radiale en flexion. La charge est appliquée sur le bord gauche parallèle à (Oy) de la plaque et défile à 7100 m/s du bas vers le haut en direction du bord opposé de la plaque le long de (Ox). Le système de découpe simulé minimise les effets de flexion et introduit majoritairement une excitation membranaire. La fréquence de coupure du signal est fixée à 27 kHz (FIG. 6).

Les paramètres de calculs utilisés pour la plaque C1, avec ou sans équipement, sont : $h = 1$ cm et $\Delta t = 2e-6$ s pour les coups de marteau (en BF), et $h = 0,7$ cm et $\Delta t = 1e-6$ s pour le tir pyrotechnique (en HF). On compare alors les résultats des simulations obtenues sur C1 en l'absence (courbes rouges) ou en présence des modèles M1 et M3 de l'équipement (courbes bleues et vertes) (FIG. 7).

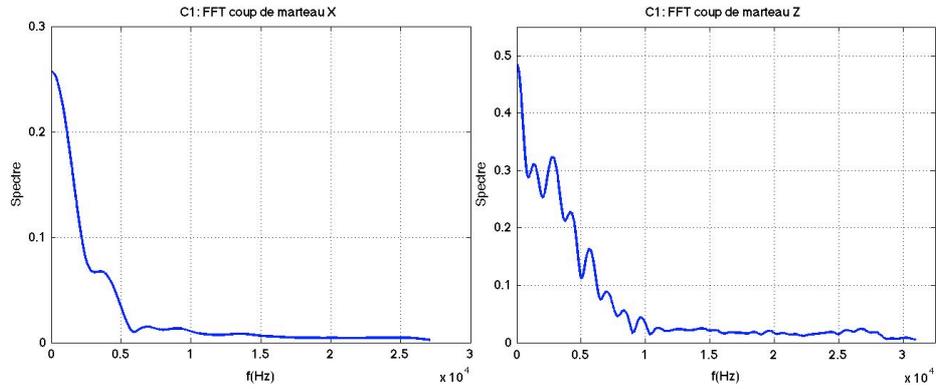


FIG. 5 – FFT des coups de marteau X et Z sur C1

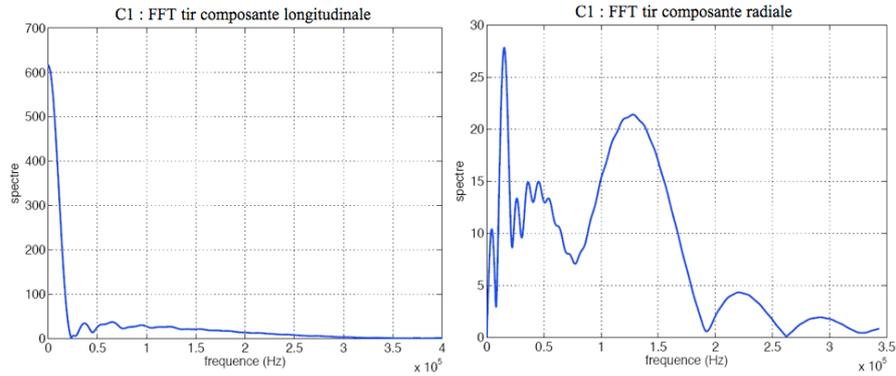


FIG. 6 –FFT des composantes longitudinale et radiale du tir pyrotechnique sur C1

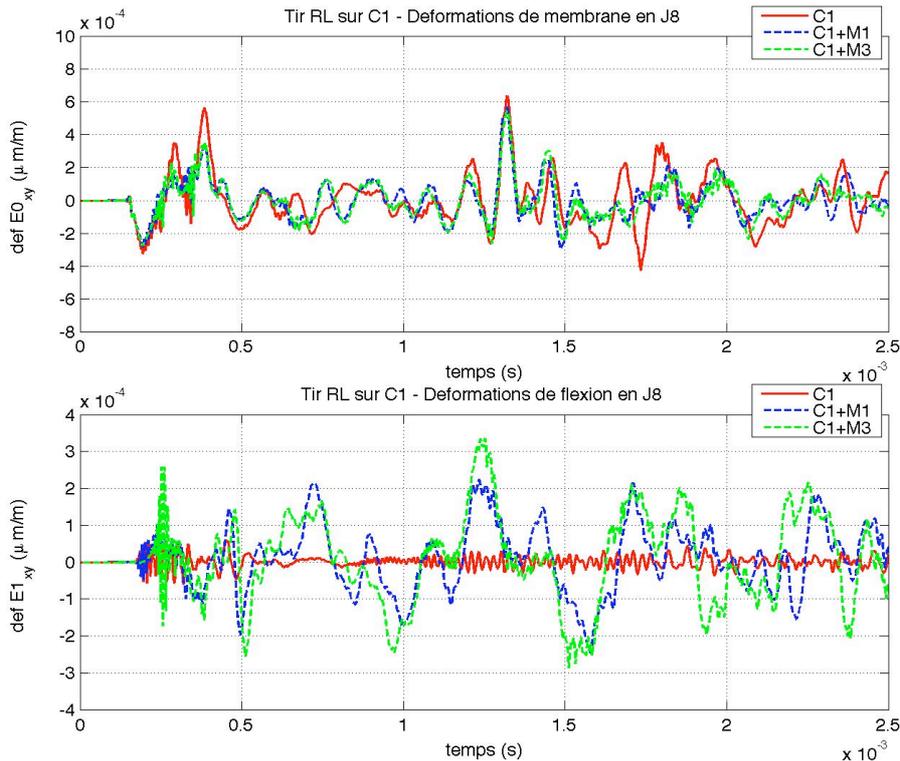


FIG. 7 – Tir pyrotechnique sur C1 : comparaison des déformations en membrane/flexion à la jauge J8

Comme l'illustre la FIG. 7, les comparaisons effectuées en BF et HF sur la plaque C1 au niveau de l'équipement montrent que la présence de ce dernier favorise les déformations hors-plan de la plaque. En effet, soumis à un chargement en membrane, l'équipement est le siège de conversion d'ondes de membrane en flexion. Les longueurs d'ondes de flexion générées sont plus petites que les dimensions de l'équipement et peuvent ainsi interagir avec ce dernier. On observe un phénomène d'amplification des déformations de flexion, les ondes semblent piégées au niveau de l'équipement.

À l'inverse, soumis à un chargement en flexion, l'équipement devient le siège de conversion d'ondes de flexion en membrane. Cependant les longueurs d'ondes de membrane générées sont plus grandes que les dimensions de l'équipement et ne peuvent pas interagir avec ce dernier. Bien que ces ondes amplifient faiblement les déformations en membrane, elles continuent de se propager dans la plaque. Comme le tir pyrotechnique injecte une composante membranaire plus importante que sa composante en flexion, dans ce cas la conversion d'ondes membrane/flexion est dominante (FIG. 7).

4.3 Etudes BF d'un ACU avec/sans équipement

Enfin, on considère un ACU placé sur une virole (cylindre en aluminium de 2 m de diamètre et 0,5 m de hauteur). L'assemblage ACU/virole est instrumenté d'un ensemble de jauges et d'accéléromètres mesurant son comportement en membrane et en flexion. L'équipement représenté par son modèle M1 est placé sur la virole, où on définit une base locale telle que l'axe (Oz) est dans la direction radiale, l'axe (Ox) est orienté suivant la génératrice et l'axe (Oy) est tangent à la surface de la virole (FIG. 8).

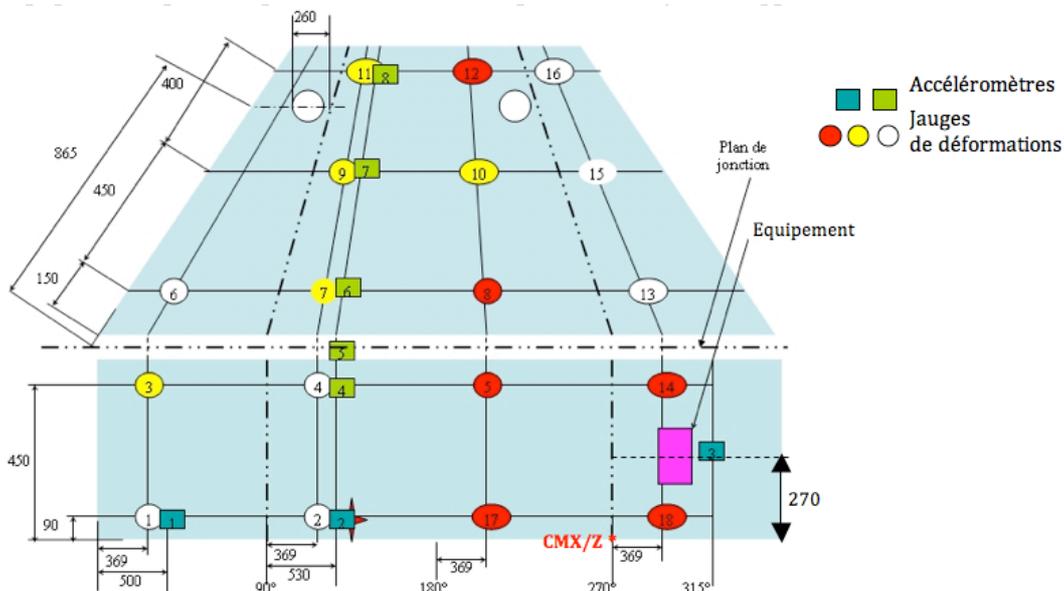


FIG. 8 – Position de l'équipement sur l'assemblage ACU/virole

Pour les études BF, les coups de marteau sont effectués soit dans une direction tangente à la virole (noté CMX) soit suivant sa normale (noté CMZ). Le signal synthétique du CMX est une charge longitudinale sollicitant la virole en compression, appliquée suivant l'axe (Ox) et le signal synthétique du CMZ est une charge radiale sollicitant la virole en flexion, appliquée suivant l'axe (Oz). Leurs fréquences de coupure respectives sont fixées à 4500 Hz pour CMX et 1800 Hz pour CMZ (FIG. 9).

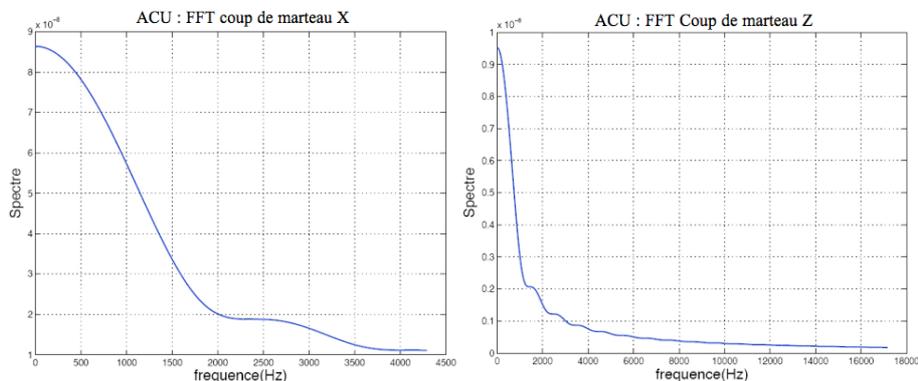


FIG. 9 – FFT des coups de marteau X et Z sur l'assemblage ACU/virole

Les paramètres de calculs utilisés pour l'assemblage ACU/virole, avec ou sans équipement, sont : $h = 1 \text{ cm}$ et $\Delta t = 3e-6 \text{ s}$ pour CMX, et $h = 3 \text{ cm}$ et $\Delta t = 5e-6 \text{ s}$ pour CMZ. On compare alors les résultats des simulations obtenues sur la virole en l'absence (courbes rouges) ou en présence du modèle M1 de l'équipement (courbes bleues) (FIG. 10).

Comme l'illustre la FIG. 10, les comparaisons effectuées en BF sur la virole au niveau de l'équipement montrent que ce dernier influence faiblement les déformations plan et hors-plan de la virole. Il semble bien être le siège d'un phénomène de conversion d'ondes membrane-flexion. Néanmoins il est difficile de se prononcer sur la dominance de cette conversion, en raison de l'existence probable d'autres phénomènes de conversions d'ondes induits par la courbure de la virole.

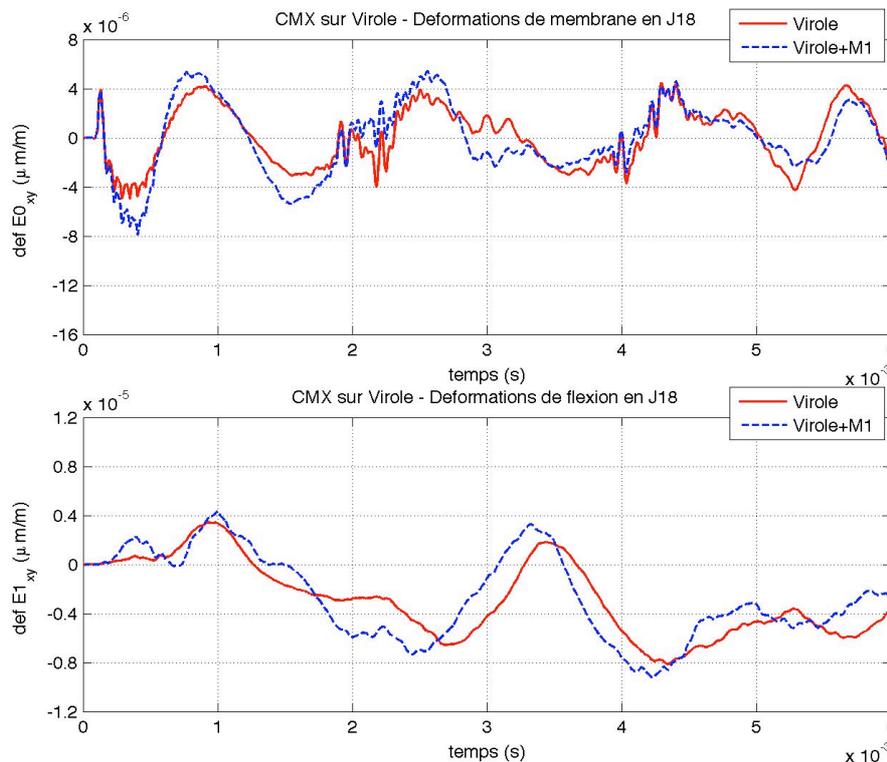


FIG. 10 – CMX sur l'assemblage ACU/virole :
comparaison des déformations en membrane/flexion à la jauge J18

5 Conclusion

Dans cet article, on a présenté l'étude de l'influence de deux différents modèles, simplifié et réel, d'équipement électronique sur le comportement d'une plaque simple soumise à des chargements BF et HF. De même, on a étudié l'influence du modèle simplifié d'équipement sur le comportement d'un assemblage ACU/virole soumis à des chargements BF. Les résultats des comparaisons de ces différentes simulations ont mis en évidence l'apparition d'un phénomène de conversion d'ondes membrane-flexion au niveau de l'équipement. D'autres études sont en cours sur l'assemblage ACU/virole en BF, avec et sans le modèle réel, et en HF, avec et sans les deux modèles d'équipement.

De prochaines études seront aussi menées sur la partie conique de l'ACU en BF et HF avec ces deux modèles d'équipement. Des comparaisons essais/calculs seront enfin réalisées sur ces différentes structures afin d'identifier et de discuter avec précision des effets de l'interaction équipement/ACU.

Remerciements

Le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) et Astrium-ST sont vivement remerciés pour le financement attribué à ce travail de recherche.

Références

- [1] A. Grédé, B. Tie, D. Aubry. *Elastic wave propagation in hexagonal honeycomb sandwich panels: Physical understanding and numerical modeling*, Journal de Physique, **134**: 507-514, 2006.
- [2] B. Tie, D. Aubry, A. Boullard. *Adaptive computation for elastic wave propagation in plate/shell structures under moving loads*, European revue of FEM, Vol**12**, n°6, pp 717-736, 2003.
- [3] T. Hughes, *The finite element method, linear static and dynamic finite element analysis*, Prentice-Hall International, 1987.