Caractérisation aux chocs pyrotechniques d'un boîtier de circuits électroniques pour satellite

Ing. E. URBAIN
ISICHt - Mons

Lors de l'envoi de satellites dans l'espace, la désunion d'éléments s'effectue à l'aide d'éléments pyrotechniques, tels que les boulons explosifs, qui engendrent des chocs éprouvant sévèrement l'électronique embarquée.
A l'aide de tests expérimentaux, les positions préférentielles, en terme de niveau de sollicitation, des composants électroniques sont recherchées au sein d'un boîtier type et un modèle aux éléments finis du boîtier et du choc est abordé.

Mots-clés : chocs pyrotechniques – propagation d'onde – accélérations – fréquences de résonances – mode de déformation – modélisation.

During satellite launching, pyrotechnic devices, like explosive nuts, are used to split off elements. Those devices induce shocks that affect the electronic on board.
Thanks to experimentation, sensitive electronic components preferential locations in terms of shock intensity are pointed out in a standard unit.
A numerical model of the unit and of the shock wave is tackled.

Key words: pyroshock - wave propagation – accelerations - eigen-frequencies – mode shapes - modelling.

1. Introduction

Dans les engins spatiaux, il est fait usage de chocs pyrotechniques pour assurer diverses opérations de fonctionnement telles que :

- la séparation d'éléments structuraux : largage des boosters, séparation de la charge utile du lanceur, libération de la coiffe de la fusée, séparation lanceur-satellite, etc ;
- le déverrouillage de mécanismes : déploiement de panneaux solaires (notamment sur un satellite), dégerbage d'antennes, largage de prises ombilicales, etc.

La désunion de ces différents éléments s'effectue généralement à l'aide de cordeaux de découpe, de boulons explosifs, de valves pyrotechniques, etc, ce qui a pour conséquence de générer une onde de choc dans les structures, à haut niveau d'accélération, dans une gamme de fréquences très étendue.

Cette onde mobilise sévèrement la dynamique de la structure à proximité directe de l'explosion, se propage dans l'armature de la fusée ou du satellite et se communique aux différents équipements embarqués, dont des boîtiers contenant des circuits électroniques de commande, relais, interrupteurs, cristaux, diodes, etc, très sensibles aux accélérations élevées (enclenchements intempestifs, fissurations, déformations permanentes, etc).

En effet, les ondes générées par les chocs pyrotechniques induisent des efforts de compression, de flexion et de cisaillement au sein des structures.
De plus, les accélérations perçues par les équipements électroniques combinent, d'une part, l'onde de choc directe durant plus d'une dizaine de microsecondes et, d'autre part, la réponse de la structure pendant plus d'une dizaine de millisecondes. Le niveau d'un choc pyrotechnique résulte des nombreuses réflexions et recombinaisons de ces ondes au travers des structures.

Il est évidemment impératif que les boîtiers électroniques continuent à assurer leurs fonctions après sollicitation par cette onde de choc.
Dès lors, il s'impose de tester ces équipements sensibles, au sol, avant leur mise en fonction dans le lanceur, afin de s'assurer qu'ils supporteront sans dommage les contraintes vibratoires extrêmes résultant de chocs pyrotechniques.

Plusieurs études ont déjà été effectuées sur des composants électroniques embarqués particuliers, afin de déterminer leurs limites de tenue au choc.
En effet, la sensibilité au choc n'est pas la même pour tous les composants ; les plus sensibles sont les relais (micro-ouverture, micro-fermeture, transfert, détérioration), les magnétiques (ferrite : matériau fragile), les quartz (cristal), etc.

Jusqu'à présent, l'électronique dans un boîtier est disposée afin de répondre de manière optimale à de multiples contraintes, telles que :
- la thermique : les éléments dissipatifs de chaleur doivent être répartis le plus possible et cette chaleur doit être évacuée ;
- l'encombrement : les boîtiers doivent être légers et de plus en plus petits ;
- la connectique (piqué, en surface, relié par des fils, des connecteurs, etc) ;
- la soudabilité et l'inspection de la bonne réalisation de la soudure ;
- l'isolation simple, multiple ;
- l'accessibilité au test électrique .

Ces différents aspects sont connus ; ils peuvent donc être calculés, estimés ou modélisés et, ainsi, être pris en compte dès la conception. Au contraire, jusqu'à présent, en termes de choc, la tenue de chaque composant est testée empiriquement. En effet, l'équipement est soumis seulement après conception, à la sollicitation définie par le cahier des charges et sa tenue au choc est validée en vérifiant, ensuite, s'il fonctionne toujours correctement.

Dans l'objectif de pouvoir, dès la conception, disposer l'électronique particulièrement sensible de manière plus judicieuse au sein d'un boîtier en termes de sollicitations au choc, la criticité de la position de l'électronique a été étudiée au sein d'un équipement de conception modulaire "standard", subissant les conséquences d'un choc pyrotechnique à proximité.

Cette étude a essentiellement deux aspects ; l'aspect expérimental consiste en des campagnes de tests au choc sur une maquette de l'équipement étudié, tandis que l'aspect modélisation consiste à établir un modèle du boîtier et du choc, par éléments finis, validé par les résultats expérimentaux, afin de pouvoir extrapoler ces résultats.

2. Description de l'élément étudié

L'étude concerne un équipement maquette, représentatif d'une PCDU (Power Conditioning and Distribution Unit) medium-power, c'est-à-dire d'un boîtier électronique destiné à assurer la gestion et la distribution de puissance dans un satellite.
La structure est constituée d'une plaque de base sur laquelle sont vissés les flasques latéraux et le flasque arrière, eux-mêmes fixés entre eux latéralement. Ce boîtier peut contenir 13 modules (cartes) vissés à la plaque de base.

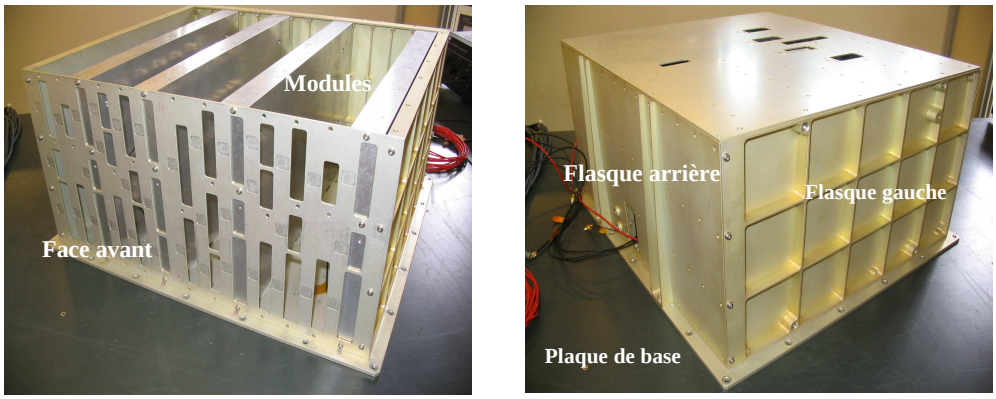

Figure 1 : Détail de la géométrie du boitier

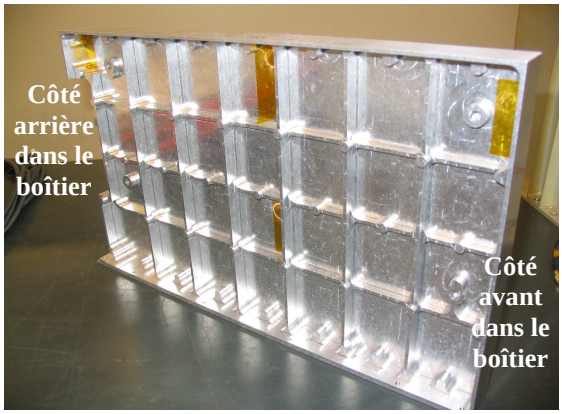

Figure 2 : Vue d'un module

La face avant est uniquement vissée sur les flasques latéraux et sur chaque module. Le capot est une plaque vissée sur les 3 flasques et sur chaque module.
Un module est constitué d'un cadre, contenant des raidisseurs, au sein duquel est, en réalité, agencée l'électronique ; dans l'équipement maquette utilisé, les cadres sont tous identiques et sont pleins, afin de reproduire la masse électronique. Les modules sont dissymétriques ; ils présentent latéralement, côté face avant, les connecteurs vers l'extérieur, associés à l'électronique qu'ils contiennent.

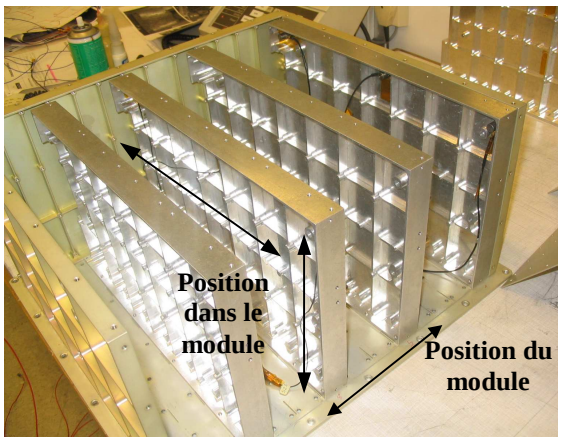

Figure 3 : Repérage de la position de l'électronique dans le boitier

Au sein de l'équipement, la position de l'électronique (point de mesures) est repérée en fonction de sa position dans le module et de la position du module qui la contient.

3. Essais expérimentaux

3.1 Description du dispositif d'essai de choc

Les tests ont été réalisés sur un dispositif d'essai aux chocs pyrotechniques en équerre, constitué d'un bloc d'aluminium fixé perpendiculairement à une plaque d'aluminium, derrière laquelle est réalisé le choc. L'ensemble est suspendu par des élingues.

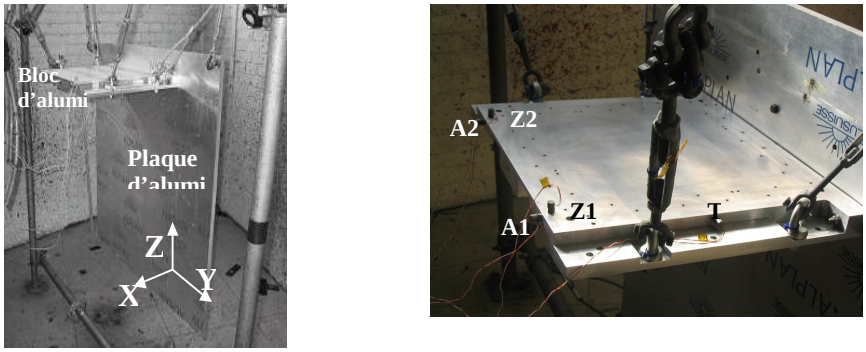

Figure 4 : Dispositif de test au choc, en équerre

Sur le bloc sont vissés 5 accéléromètres de contrôle : 2 axiaux (A1, A2, suivant x), 2 verticaux (Z1, Z2, suivant z) et un transversal (T, suivant y), les quatre premiers mesurant les sollicitations à l'extrémité opposée au choc. Ces accéléromètres permettent ainsi de connaître les accélérations auxquelles va être soumis le boîtier (accélérations d'entrées).
L'onde explosive est initiée par un pistolet ; elle se propage dans le cordon NONEL (NON ELectrique) et déclenche le détonateur NONEL, fixé à l'arrière de la plaque d'aluminium verticale, qui fait exploser le cordeau détonant .

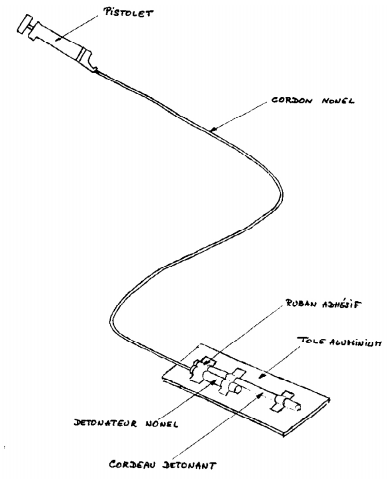

Figure 5 : Représentation de la chaîne pirotechnique

Pour enregistrer les valeurs d'excitations auxquelles a été soumis le matériel à tester, les capteurs capables de supporter d'importants niveaux d'accélération sont les accéléromètres à cristaux piézoélectriques.

3.2 Première campagne d'essais

La mise en œuvre d'un choc pyrotechnique s'avère relativement lourde à reproduire de nombreuses fois (préparation du cordeau, du détonateur, du pistolet, etc.) et nécessite des mesures de sécurité.
Dès lors, les chocs « vérin » sont souvent utilisés pour débuter une campagne de qualification, car ils sont plus rapidement reproductibles et engendrent une sollicitation transitoire semblable.
Dans le cadre de ce travail, l'utilisation du vérin étant appropriée, les chocs ont été réalisés à l'aide d'un vérin pneumatique, vissé perpendiculairement derrière la plaque d'aluminium verticale du système de test, au niveau du bloc.

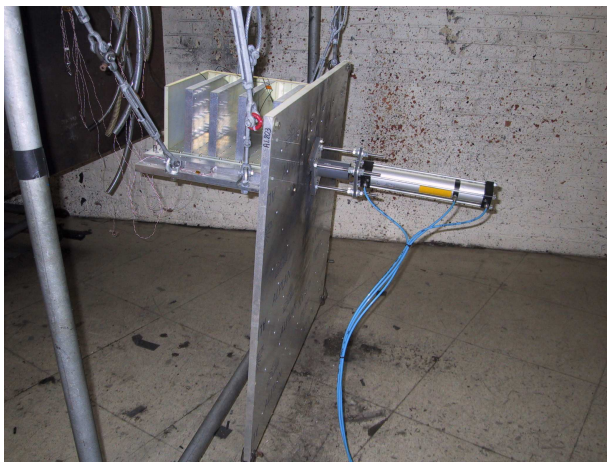

Figure 6 : Disposition du vérin sur le dispositif de test

L'équipement est vissé au bloc parallèlement à l'axe x ; de cette manière, il est disposé dans sa position la plus excitable, car le choc agit dans une direction perpendiculaire aux modules.

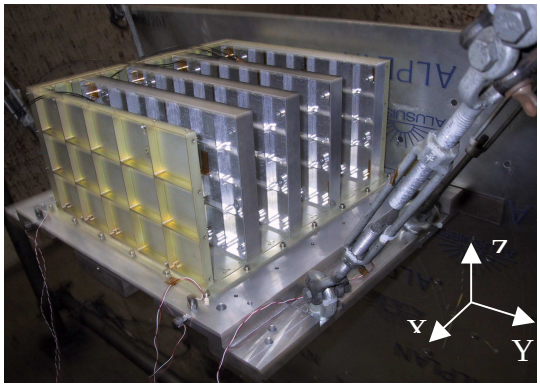

Figure 7 : Positionnement du boîtier sur le banc d'essai

Les mesures au sein du boîtier ont été effectuées axialement, c'est-à-dire dans l'axe x du choc, avec des accéléromètres collés.

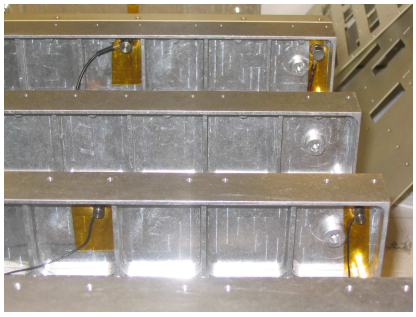

Figure 8 : Positionnement des accéléromètres de mesures

La première campagne d'essais avait pour objectif d'évaluer un grand nombre de positions, afin de dégager une ligne de conduite générale et une méthode de travail.
Pour faciliter les manipulations (pose des accéléromètres), les essais ont été effectués sur le boîtier ouvert, c'est-à-dire sans face avant et sans capot supérieur, avec uniquement 4 modules (cartes) disposés à l'intérieur.

Ces cartes ont été réparties au sein du boîtier, aux positions 1, 5, 8 et 11 (sur 13 emplacements possibles), afin de tester l'incidence de la position axiale (x).

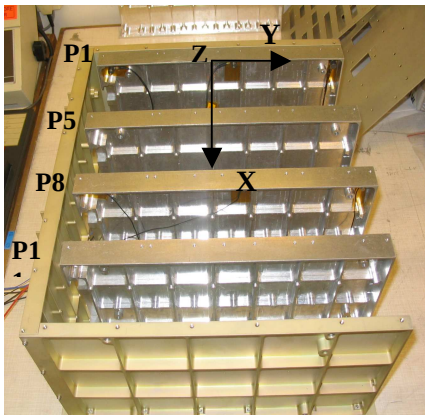

Figure 9 : Disposition des modules au sein du boîtier

Au sein de chaque module, huit points de mesures ont été testés, afin d'évaluer l'influence de la position suivant y et suivant z.

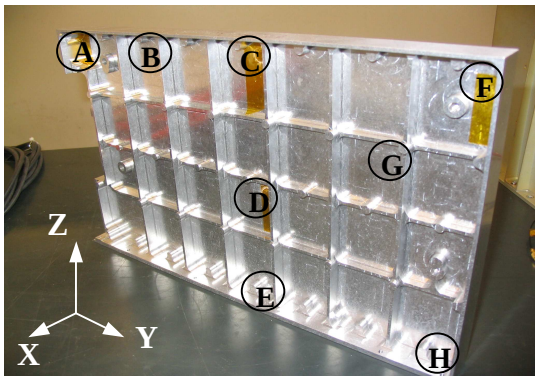

Figure 10 : Points mesurés dans le module

Les réponses relevées par les accéléromètres de mesures collés dans l'équipement ont montré que l'ensemble du boîtier ouvert présente une sensibilité à certaines basses fréquences qui se traduit par d'importantes amplifications des accélérations d'entrée (jusqu'à 600 % d'amplification).

En hautes fréquences (au delà de 2000 Hz), par contre, il est apparu que la plupart des positions transmettent unitairement ou atténuent la sollicitation.
Les résultats ont également mis en évidence qu'à la première fréquence amplifiée, toutes les cartes présentent une augmentation des amplifications avec la hauteur de positionnement ; à la seconde fréquence amplifiée, la mi-hauteur de module amplifie autant que le haut ; en hautes fréquences, ce sont les positions les plus critiques en basses fréquences qui atténuent le plus la sollicitation.

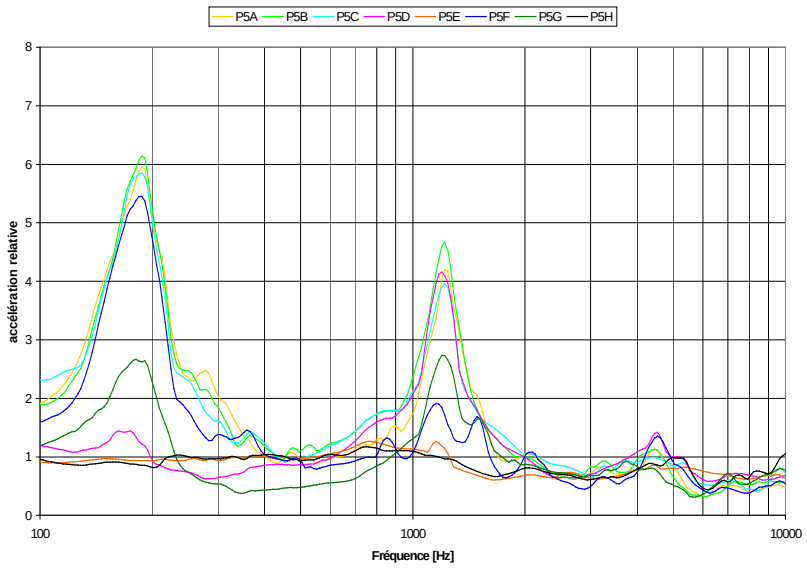

Figure 11 : Exemple de résultats obtenus en diverses positions au sein d'un module (A, B, etc) occupant une position précise dans le boîtier (position 5)

Afin de comprendre et de justifier une corrélation entre les degrés d'amplification et le positionnement au sein d'un module, la question s'est posée d'un éventuel lien avec les modes propres (fréquences et déformations de résonance) de la structure que le choc exciterait.

3.3 Tests de vibration

Dans le but de vérifier cette hypothèse, l'équipement maquette a été soumis à un test de vibration dans la même configuration ouverte qu'en choc.

La détermination des modes d'un équipement consiste à soumettre la structure à un balayage sinus (Sine Survey Test), c'est-à-dire à une excitation produite par variation continuelle (de façon linéaire ou logarithmique) et croissante de la fréquence d'une onde sinusoïdale d'amplitude constante.
Ces tests sont réalisés à l'aide d'une table vibrante constituée d'un shaker, de plateaux supportant les structures à tester et d'armoires de contrôle assurant la commande et la régulation de l'excitation.

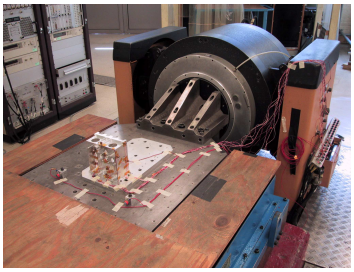

Figure 12 : Dispositif de test aux vibrations

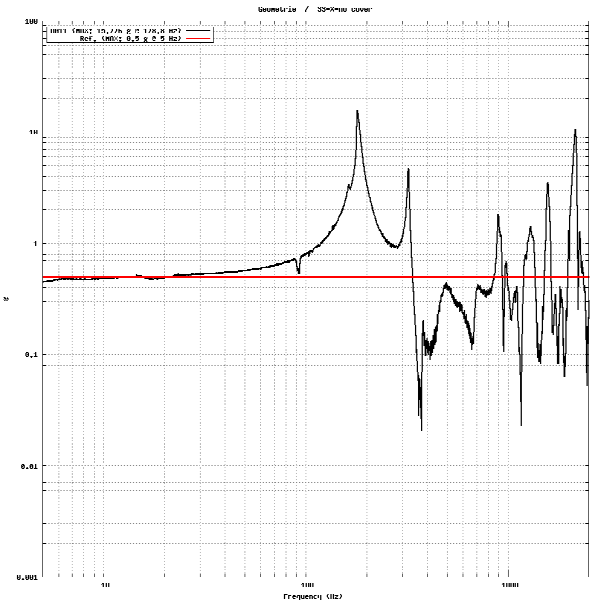

Figure 13 : Exemple de résultat graphique obtenu en un point d'un équipement soumis à un balayage sinus

Par rapprochement avec les résultats de choc, il s'est avéré que les basses fréquences, amplifiées par la sollicitation transitoire, correspondent aux fréquences modales du boîtier dans cette configuration.
Le choc excite le mode de basculement des modules autour de leur pied ; plus la position est haute dans le module, plus le mouvement est ample, ce qui correspond à l'accroissement d'amplification entre les points testés au choc.
Il excite également le mode d'incurvation des cartes ; par conséquent, les points les plus critiques sont en haut et en milieu de module.
La connaissance des déformations modales engendrées a ainsi permis de comprendre les différences d'amplification entre les divers emplacements dans un module.

Quant à la criticité de l'emplacement du module au sein du boîtier, on aurait pu croire que les accélérations diminuent avec l'éloignement du module dans le boîtier par rapport à la source du choc.
La criticité s'est avérée, en réalité, également dépendante de la fréquence et beaucoup moins « prévisible », car elle n'est pas associée à un mode de déformation.

Cette première approche a montré que la criticité de la position varie avec la fréquence, tant au sein d'un module que selon la position de celui-ci dans l'équipement, et, qu'en fonction de ces deux paramètres, elle s'exprime surtout par un ensemble de cas particuliers.

3.4 Seconde campagne d'essais

Cette seconde campagne d'essais a été réalisée sur boîtier fermé, c'est-à-dire avec la face avant et le capot supérieur, à l'aide du même dispositif de test et dans la configuration à quatre modules uniquement.

La configuration avec capot est nettement plus rigide ; il en résulte une diminution des degrés d'amplification, des fréquences sensibles plus élevées et moins nombreuses, ainsi qu'une meilleure homogénéité des résultats entre les différentes cartes.
La détermination des modes par essai de vibration a également permis d'identifier les fréquences amplifiées en choc à des modes de l'équipement et de comprendre les déformées engendrées.

Globalement, les positions critiques en basses fréquences sont les points mobilisés par les modes excités par le choc, c'est-à-dire le mode de basculement des modules autour de leur pied avec une amplification croissante avec la hauteur et le mode d'incurvation des cartes avec la mi-hauteur plus critique.
Dans cette gamme de fréquences, les positions au sein du boîtier ne se distinguent pas significativement.
En hautes fréquences, les positions qui atténuent le plus sont également les plus défavorables en basses fréquences.
Le pied de carte n'amplifie à aucune fréquence mais n'atténue pas non plus.
Le choix du positionnement doit donc être particulier à chaque composant, en fonction de sa sensibilité, de ses limites et des résultats détaillés par ce travail.

4. Intérêts d'une modélisation

Les résultats expérimentaux présentant des conclusions assez diversifiées et peu extrapolables, l'intérêt d'une modélisation globale des essais est rapidement apparu, afin de pallier cette limite et de compléter les informations déjà obtenues expérimentalement.
L'objectif était de disposer d'une représentation proche de la réalité de l'assemblage équipement-dispositif d'essai et de la sollicitation appliquée.
La création de ce modèle a été effectuée à l'aide du logiciel aux éléments finis ANSYS.

4.1 Modélisation de l'équipement

La première phase de création du modèle consistait à modéliser l'équipement étudié et ses conditions de fixation sur le système de test.
Le boîtier est tout d'abord modélisé dans la configuration ouverte, donc sans capot et sans face avant, car c'est dans cette disposition que le plus de résultats expérimentaux sont disponibles pour la comparaison et la validation du modèle.
De plus, la structure étant complexe, un premier modèle permet d'éprouver si la modélisation peut donner des résultats satisfaisants.

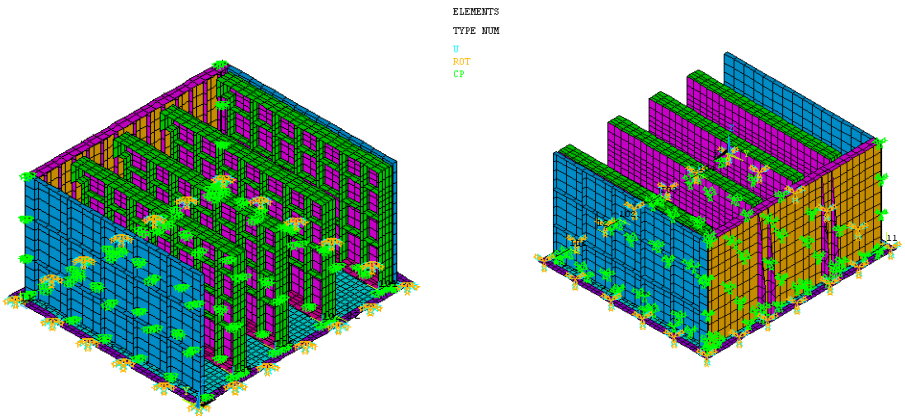

Figure 14 : Modèle du boîtier en configuration ouverte

La validation de ce modèle a été effectuée par vérification des correspondances modales entre le modèle et l'équipement réel et s'est avérée satisfaisante.

4.2 Modélisation du dispositif d'essai

La seconde phase du travail consistait à modéliser le dispositif de test sur lequel ont été réalisés les chocs c'est-à-dire le bloc d'aluminium, fixé perpendiculairement à la plaque d'aluminium, elle même suspendue par des élingues.

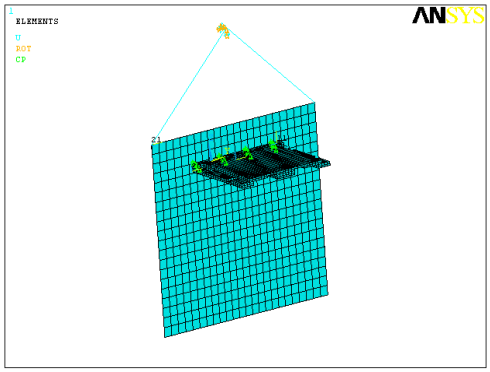

Figure 15 : Modèle aux éléments finis du dispositif de test

4.3 Modélisation de l'excitation

Le choc expérimental n'étant pas directement accessible à la mesure, la modélisation de l'excitation a constitué la partie suivante de l'étude.
Le choc a été modélisé par un profil de force de forme triangulaire, caractérisé par sa durée τ et son intensité F_{max}.

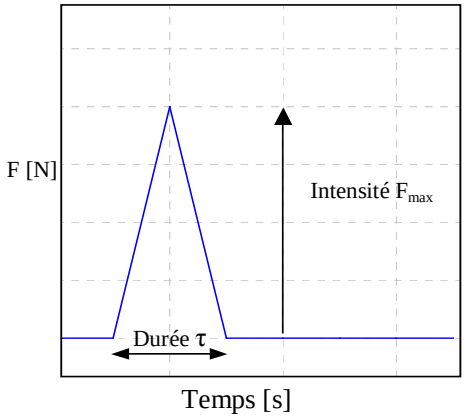

Figure 16 : Profil de force envisagé

La recherche des paramètres du choc équivalent a été effectuée par comparaison des résultats expérimentaux mesurés par les accéléromètres de contrôle axiaux, positionnés à l'extrémité libre du bloc lors d'un essai sans équipement, avec les résultats obtenus par l'analyse transitoire du modèle correspondant, au même emplacement.

En effet, pour chaque couple de paramètres (Fmax et τ), le profil de force est injecté dans le modèle aux éléments finis, au nœud du modèle du bloc coïncidant avec le positionnement de la charge explosive sur le système d'essai.
Les accélérations résultantes à l'extrémité libre du bloc (emplacement des accéléromètres de contrôle dans la réalité) sont calculées à l'aide de la méthode « par superposition des modes » proposée par le logiciel ANSYS.
Le principe de cette dernière est d'obtenir la réponse d'un système en sommant les réponses calculées pour chaque mode propre. Elle nécessite, de ce fait, une analyse modale numérique préalable.

Cette méthode de travail a permis d'établir le modèle de l'excitation par vérin et de valider le modèle du dispositif de test en équerre de manière relativement satisfaisante.

5. Conclusions

Les perspectives de ce travail sont multiples, celui-ci constituant une première étape, dans l'objectif de prévoir et de contrer les conséquences, au sein d'un équipement de conception modulaire, d'un choc à proximité.

Concernant la partie modélisation, les trois modèles obtenus peuvent désormais être réunis afin de reproduire la configuration des tests effectués expérimentalement. L'étape suivante consiste à vérifier si l'ensemble de ce modèle « équipement-dispositif d'essai » est suffisamment précis pour permettre de compléter les informations sur la criticité des positions au sein du boîtier, l'objectif étant de pouvoir désormais se fier aux résultats obtenus par calcul, en tous points du boîtier.
La validation de ce modèle complet par l'étude, dans le modèle, des positions testées expérimentalement et la comparaison de ces résultats obtenus avec la pratique, est à concrétiser.

L'approfondissement de la partie expérimentale consisterait, quant à elle, à se rapprocher de la structure réelle en remplaçant les modules pleins et continus par des cartes réelles, cadres sans matière entre les raidisseurs.
Au sein de celles-ci serait disposée, dans une première phase, une plaque d'époxy (support de circuits imprimés) sans électronique mais sur laquelle pourraient être placées des masses locales symbolisant les principaux composants.
La phase suivante utiliserait alors des composants électroniques réels et étudierait les améliorations structurelles éventuelles spécifiques au positionnement.

6. Bibliographie

[1] LALANNE C., *Vibrations et chocs mécaniques*, Volume 2 : Chocs mécaniques, Hermes, 1999.

[2] WATTIAUX D., *Caractérisation de chocs pyrotechniques et de l'interaction entre comportement vibratoire et électrique de relais électromagnétiques*, TFE de DEA, Faculté Polytechnique de Mons, A.A. 2003-2004.

[3] HRECZYNSKI L., *Chocs pyrotechniques : caractérisation de l'excitation*, TFE, Faculté Polytechnique de Mons, A.A. 2001-2002.

[4] RINCHARD L., *Reconstitution numérique et expérimentale d'un environnement de type choc pyrotechnique*, TFE, Faculté Polytechnique de Mons, A.A. 1996-1997.

[5] BELLENS V., *Corrections des signaux issus de chocs pyrotechniques en vue du calcul du spectre de réponse au choc*, Etude Industrielle, Faculté Polytechnique de Mons, A.A. 1999-2000.

[6] DIQUAS G.., *Caractérisation de la tenue aux chocs pyrotechniques de composants magnétiques sensibles utilisés dans les applications spatiales*, TFE, Institut Supérieur Industriel de Bruxelles, A.A. 2002-2003.