

# Modélisation de la génération et de la propagation des chocs mécaniques dans les structures spatiales

Nathan PASCAL<sup>1-2</sup>, Simon LEMAY<sup>1</sup>, Miguel CHARLOTTE<sup>2</sup>, Frédéric LACHAUD<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Centre National d'Etudes Spatiale (CNES), Centre Spatial de Toulouse (CST), 18 Avenue Edouard Belin, 31400, Toulouse, France

<sup>2</sup> Institut Clément Ader (ICA), Université de Toulouse, ISAE SUPAERO, CNRS, 3 Rue Caroline Aigle, 31400, Toulouse, France

---

**Résumé** — Pour les systèmes spatiaux, les chocs mécaniques représentent une source de spécification importante. Il est essentiel de prédire les niveaux attendus en vol et la tenue des équipements à ces niveaux de chocs spécifiés. L'objectif de cette communication est donc de présenter les recherches menées pour établir des méthodes efficaces de modélisation des chocs mécaniques dans les systèmes spatiaux. Ce travail s'inscrit dans une thèse de doctorat intitulée « Modélisation de la propagation et de la génération des chocs mécaniques dans les structures spatiales ».

**Mots-clés** — Chocs, mécanique, modélisation, simulation, structure, interface.

---

## 1 Introduction

### 1.1 Contexte général

Un des objectifs dans le développement d'un système spatial est de s'assurer que celui-ci parviendra, malgré les nombreuses sollicitations qu'il subira au cours de sa vie, à rester fonctionnel, et répondre aux besoins attendus de sa mission. Sachant que de nombreuses sollicitations mécaniques sont à prévoir pour un système spatial, un des objectifs de son développement est de le dimensionner. Il existe différentes sollicitations qui imposeront donc chacune leur dimensionnement. Parmi ces sollicitations, les chocs mécaniques constituent une part importante des spécifications des systèmes spatiaux. En effet, les chocs sont multiples, souvent significatifs et de natures diverses. Nous étudions les chocs mécaniques, émanant de différentes sources : le lanceur (séparation des étages, séparation de la coiffe, etc.), la libération du satellite du lanceur, les systèmes pyrotechniques et appendices (déploiement de panneaux solaires, antennes, instruments, etc.). Dans le cadre de la thèse, nos intérêts se portent sur les chocs mécaniques résultant du fonctionnement nominal du satellite ou du lanceur, en excluant donc les chocs mécaniques « hyper-vitesse » (débris spatiaux) qui constituent une problématique distincte de celle abordée ici.

### 1.2 Problématique

Pour qualifier un système spatial, il convient de faire des essais de chocs aux niveaux qu'il subira durant son fonctionnement nominal. Mais avant de soumettre un équipement aux essais de qualification de choc, il est essentiel de connaître la tenue de notre équipement aux niveaux de choc attendus en vol et décrits par la spécification. Bien que la simulation puisse être une option, il est important de noter que les méthodes de modélisation sont encore peu répandues car souvent peu maîtrisées et que les prédictions reposent souvent sur l'analogie (avec des projets antérieurs) et sur l'expérience (en utilisant des règles de dimensionnement empiriques). Cela représente un risque de ne pas correctement qualifier le système (sous-qualification ou sur-qualification), et d'autant plus de risque pour les éléments sensibles. Ainsi, un des objectifs clés de cette thèse consiste à développer des méthodes et des outils de modélisation et de post-traitement pour prédire les niveaux de chocs en essai. Ainsi, il est nécessaire de définir des méthodes de modélisation en recalant des modèles sur des essais. Ceci vise à améliorer la compréhension des phénomènes physiques liés à la génération et la propagation d'un choc mécanique, ainsi qu'à prédire avec précision les niveaux de chocs pendant les essais, notamment aux interfaces des éléments sensibles pour identifier au plus tôt les criticités.

### 1.3 Définition d'un choc mécanique (au sens de l'ECSS)

La définition d'un choc, ses méthodes d'analyse et l'ensemble des exigences concernant les chocs d'intérêt pour le dimensionnement des systèmes spatiaux se trouvent dans le « handbook » ECSS « European Cooperation for Space Standardization » [1] [2] notamment. Rappelons donc ce qu'est un choc mécanique au sens de l'ECSS.

Selon l'ECSS [1] [2] un choc mécanique est défini comme suit : un chargement mécanique transitoire local de courte durée (de 50  $\mu$ s à 20 ms), de fréquence élevée (de 100 Hz à 100 kHz), d'amplitude élevée avec un temps de montée significatif (environ 10  $\mu$ s), caractérisé par une enveloppe d'exponentielle décroissante. Concernant les aspects physiques d'un choc, l'ECSS [2] les décrit comme une combinaison d'ondes de traction-compression, de flexion et de cisaillement. À cela s'ajoutent des phénomènes de réflexion, de dissipation et de diffraction aux conditions limites et aux interfaces. Il est important de distinguer deux phases, comme le souligne l'ECSS [2] : la phase de chargement mécanique et la phase d'oscillations libres. En effet la phase de chargement mécanique s'avère nettement plus courte que la phase d'oscillations libres du système : le chargement mécanique, phase purement transitoire, peut varier entre 50 $\mu$ s et 20ms, tandis que la réponse d'un système à un choc en oscillations libres, phase pseudo-stationnaire, peut s'étendre jusqu'à 100ms.

### 1.4 Contexte des chocs mécaniques

Comme mentionné précédemment, les sources de chocs sont variées (lanceur, libération du satellite, systèmes pyrotechniques et appendices, etc.). Ces sources de chocs ont un impact significatif sur le satellite, sa structure, mais surtout au niveau des systèmes sensibles, tels que l'électronique et les mécanismes de précision. On comprend donc l'importance d'évaluer ces chocs pour prévenir leurs effets. Il est difficile de caractériser un choc à partir d'une simple courbe temporelle, car certaines accélérations interviennent sur des durées très courtes, tandis que d'autres, de plus faible amplitude, peuvent durer plus longtemps. Ainsi, la notion de fréquence joue un rôle important dans l'évaluation de la criticité du choc. C'est pourquoi, nous utiliserons une méthode très répandue pour évaluer les chocs, appelée SRC, qui signifie « Spectre de Réponse au Choc » (SRS : Shock Response Spectrum, en anglais), qui permet de représenter graphiquement la sévérité d'un choc.

Le principe du SRC est de définir un ensemble de systèmes à un degré de liberté, chacun ayant sa fréquence propre, auquel on applique le signal temporel d'accélération à traiter en entrée. On trace ensuite les réponses temporelles maximales absolues de chaque système à un degré de liberté en fonction de la fréquence propre de ces systèmes. La Figure 1 donne pour illustration un signal temporel et son SRC associé.

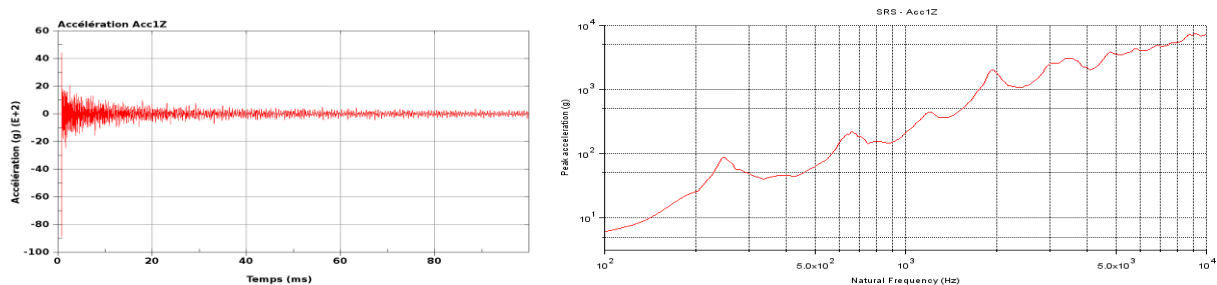


Figure 1 – Signal temporel d'un choc et SRC associé

Le SRC est donc une manière de représenter la sévérité d'un choc dans l'ensemble de la plage de criticité du phénomène avec une plage de fréquence de 100 à 10 000 Hz très généralement choisie pour définir les spécifications d'un choc mécanique dans le spatial (champ moyen et lointain) [1].

## 2 Expérimentations et modèles numériques

Afin de mettre en place des outils et des méthodes pour réaliser des dimensionnements aux chocs, une première approche (cf. Figure 2) a été de réaliser une comparaison essais-calculs sur un modèle très simplifié d'un panneau structural de satellite avec une gueuse d'un équipement vissé dans le panneau par des vis M5, avec différentes conditions d'interfaces. Il s'agit donc d'une gueuse de 600g et d'une plaque en aluminium sur laquelle sont lâchées des billes en acier de différentes masses (entre 67 g et 535 g) et de différentes hauteurs (entre 15 et 60 cm, correspondant à une vitesse initiale dans le modèle). La plaque est isolée mécaniquement avec des mousses pour recréer les conditions limites libres. Le travail d'une précédente étude interne a permis de montrer que la faible intensité du chargement, les faibles déplacements engendrés et la forte différence de rigidité entre la plaque et les mousses permettent aux mousses de correctement isoler mécaniquement le système sur l'intervalle de temps étudié et ainsi simuler des conditions aux limites libres. Les niveaux de chocs reproduits dans ces cas simples sont équivalents en terme d'accélération SRC aux chocs mécaniques subis par les satellites dans leur usage nominal.

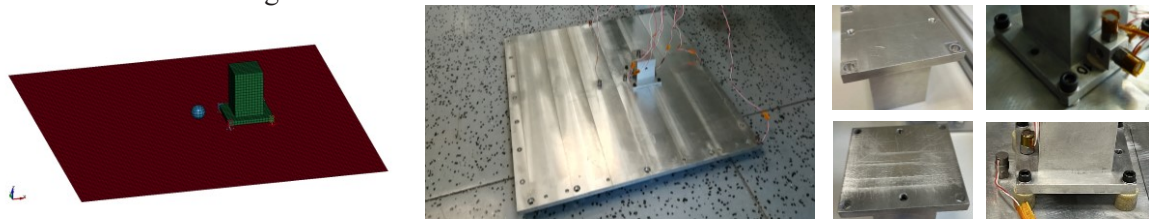


Figure 2 – Banc d'expérimentation et configurations de la gueuse (à droite) et modélisation de l'expérimentation (à gauche)

Il a été choisi pour cette étude d'utiliser le logiciel LS DYNAS pour réaliser des modèles par éléments finis en dynamique explicite, et SCILAB pour effectuer un post traitement des accélérations temporelles relevées dans le modèle. La méthode de comparaison dans cette étude utilisera les résultats SRC de chaque accélération temporelle. Le Tableau 1 décrit les propriétés de la modélisation et le Tableau 2 indique les mots-clés LS-DYNA et paramètres utilisés pour nos simulations.

Parts	Bille	plaque	gueuse
Propriétés	loi elasto-plastique bilinéaire puis rigide après 3ms (choc)	loi elasto-plastique bilinéaire	
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	7800	2780	2386
E (GPa)	195	74,5	74,5
Pr	0,3	0,3	0,3
Yield stress $\sigma_y$ (MPa)	1000	25	300
Tangent modulus $E_t$ (MPa)	20000	25000	25000
géométrie (mm)	sphérique	543.5×560×13	Base : 80×80×8 et 50×50×80
Formulation	Hexaédrique en intégration complète	Coques quadrangulaires Belytschko-Tsay en intégration complète	Hexaédrique en intégration complète

Tableau 1 – Propriétés concernant les éléments constituant le modèle

La restitution des accélérations au niveau des accéléromètres est faite aux nœuds correspondants au centre géométrique de leur interface avec la pièce sur laquelle ils sont fixés (accélérations hors plan). Pour le pas de temps d'écriture des sorties, dit « pas de temps d'archivage », il est principalement de 0.0008 ms suite à une étude théorique et paramétrique réalisée sur la fréquence

d'archivage. Concernant le pas de temps de calcul des modèles, le pas de temps « stable » calculé par LS-DYNA est de l'ordre de  $10^{-4}$  ms. Cependant, nous avons décidé de systématiquement diminuer ce pas de temps de calcul lors du choc entre la bille et la plaque par une courbe de limitation maximale de pas de temps.

Si définition d'un contact numérique	CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE SOFT = 1 (=2 avec la définition de SEGMENTS) FS=0.1 (static coefficient of friction) VDC=20 (viscous damping coefficient)
Si définition d'un pré-serrage	INITIAL_AXIAL_FORCE_BEAM (6636 N, vis M5)
CONTROL_HOURLGLASS	IHQ = 8 / QH = 0.1 Hourglass coefficient
CONTROL_SHELL	valeurs par défaut
CONTROL_ACCURACY	OSU = 1 (on) / NN = 4 (on for shell, thick shell and solid elements)
CONTROL_BULK_VISCOSITY	Default quadratic viscosity (Q1) = 1.5 Default linear viscosity coefficient = 0.7 Type = -2
DATABASE_OPTION	DT GLSTAT = 0.1 ms / DT MATSUM = 0.1 ms DT RFORC = 0.1 ms / DT SBTOUT = 0.01 ms DT SLEOUT = 0.1 ms

Tableau 2 – Propriétés concernant les paramétrages du modèle

### 3 Etudes paramétriques réalisées

Des études paramétriques sur le modèle de la plaque seule décrit ci-dessus ont été réalisées en fonction des paramètres suivants :

- Le maillage de la bille : étant donné que la bille ne subit que des déformations très faibles et que l'étude ne s'intéresse qu'aux accélérations sur la plaque, l'étude paramétrique a montré que 4 éléments sur le rayon sont suffisants.
- Le maillage de la plaque : les éléments peuvent être de 20 mm, mais pour des raisons de limitations géométriques de représentativité, nous nous limiterons entre 5 mm et 10 mm.
- Le pas de temps de calcul : le pas de temps de calcul lors du choc nécessite une limitation.

Des études paramétriques sur le modèle de la plaque avec la gueuse de colonne de gerbage vissée sur la plaque ont été réalisées en fonction des paramètres suivants :

- Le maillage de la gueuse : du fait de contraintes de modélisation de la fixation et du positionnement des accéléromètres, les éléments de la gueuse seront d'environ 5 mm.
- La modélisation des accéléromètres uni et triaxiaux : sera décrite dans la partie suivante.
- La définition d'un contact entre les pièces et d'un pré-serrage des vis : ces définitions apportent des instabilités dans les modèles, notamment sur le pas de temps de calcul optimal, le pas de temps d'archivage optimal, et les bilans d'énergies internes. Ainsi, ces définitions influent fortement sur les résultats. C'est ce que nous verrons dans la partie suivante.
- Le pas de temps de calcul : optimisation en fonction de la modélisation de l'interface vissée.
- Le pas de temps d'archivage : optimisation en fonction de la modélisation de l'interface vissée.
- Les méthodes de modélisation de la fixation entre la gueuse et la plaque et leurs paramétrages : il s'agit logiquement de l'étude paramétrique la plus importante. Différentes configurations de fixation de la gueuse ont été testées, afin de généraliser les méthodes définies pour la modélisation de la fixation de deux pièces entre elles : surépaisseur d'usinage de la gueuse, contact plan/plan sans les surépaisseurs d'usinage, interface rondelles acier, rondelles permaglass de différentes hauteurs, interface isolant thermoconducteur.

## 4 Résultats et discussions

### 4.1 L'expérimentation et la modélisation des accéléromètres triaxiaux

Des expérimentations ont été menées en mesurant les accélérations dans le plan au moyen d'accéléromètres triaxiaux de type « cube » 16×16×16mm, sur lesquels se fixent 3 accéléromètres monoaxiaux (cf. Figure 3), pour un total d'environ 22g.



Figure 3 - Accéléromètre triaxial de type « cube »

Dans la méthode de modélisation de ces accéléromètres, deux paramètres importants interviennent : la masse équivalente et l'excentricité. Nous allons comparer l'accélération prise au point de restitution directe sans masse ajoutée et l'accélération prise à un nœud excentré du point de restitution avec une masse équivalente à celle de l'accéléromètre utilisé (auquel cas une poutre sera utilisée pour faire la liaison entre le nœud et le point de restitution de l'accéléromètre). Constatons que les résultats de la modélisation avec la masse équivalente et l'excentricité corréleront beaucoup mieux les résultats expérimentaux que les résultats sans cette masse et cette excentricité (cf. Figure 4). La conclusion est la même pour des accéléromètres triaxiaux légers de choc, de l'ordre de grandeur du gramme. De la même manière, une publication sur la simulation de la propagation des chocs en utilisant la FEM (Finite Element Method) [3] montre l'importance de la modélisation de l'excentricité pour reproduire les niveaux mesurés en essais.

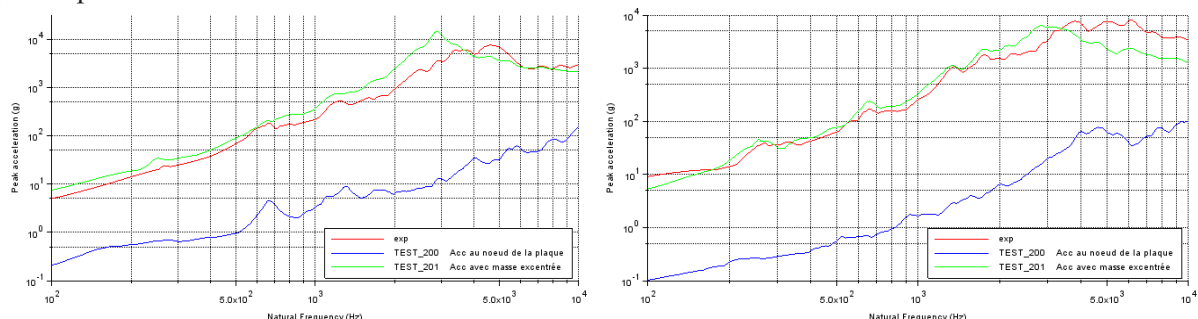


Figure 4 - Comparaison SRC accéléromètres sur plaque – modélisation des accéléromètres triaxiaux

De plus, expérimentalement, les niveaux d'accélérations dans le plan peuvent être jusqu'à 100% plus élevés avec les accéléromètres triaxiaux de type « cube » par rapport à des accéléromètres triaxiaux de choc plus légers. L'influence des éléments d'essais peut s'étendre au-delà de l'instrumentation, comme l'explique une publication de la NASA (National Aeronautics and Space Administration) [4], dont un banc d'essai de choc diminuait les niveaux de SRC aux fréquences de résonances du banc.

### 4.2 Modélisation de l'interface de fixation

Il existe de multiples façons de représenter une même liaison entre deux pièces, en fonction du niveau de complexité souhaité par exemple [5]. Une modélisation a permis de donner des résultats SRC des accéléromètres sur la gueuse avec plus de 80% des valeurs dans l'intervalle des +/-3dB des résultats expérimentaux, dans quasiment l'ensemble des configurations étudiées. Deux ensembles de nœuds forment chacun un corps rigide, un pour chaque pièce (CNRB – Constrained Nodal Rigid Body). Les deux corps rigides sont reliés par une poutre, représentant la vis utilisée. Les caractéristiques matériaux et géométriques de la poutre reprennent celles de la vis utilisée. Les dimensions des corps rigides nodaux sont 1.2 fois ceux de la vis utilisée (cf. Figure 5).

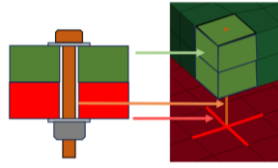
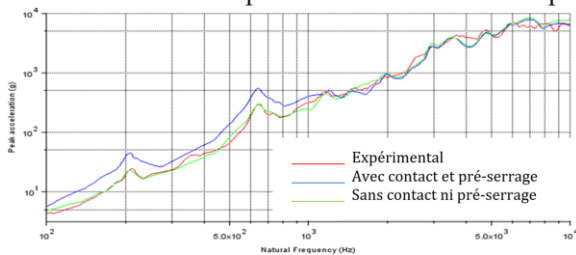


Figure 5 – Modélisation de la fixation choisie

Aucun contact ni pré-serrage n'est défini dans le modèle au niveau des interfaces. Néanmoins, ce choix de modélisation, n'est pas adapté pour le cas du contact plan/plan sans surépaisseur d'usinage, dû aux surfaces de contact grandement supérieures à la zone de fixation et aux interactions locales non-linéaires entre les deux surfaces en contact produites à hautes fréquences. Ce modèle ne répond donc pas aux attentes pour le moment et ces recherches seront poursuivies par la suite.

Pour des rondelles plates circulaires, à l'interface entre les pièces, de grande épaisseur (supérieure à quelques millimètres, rondelles thermiques isolantes), celles-ci doivent être représentées par des poutres de section tubulaire, avec des diamètres extérieur et intérieur égaux à ceux du moyen utilisé. Dans le cas des rondelles de faible épaisseur (d'ordre de grandeur du millimètre : rondelles inox), il n'est pas nécessaire de les modéliser dans notre cas, car la rigidité apportée par la poutre représentant la rondelle est négligeable face à la rigidité mise en jeu par la poutre représentant la vis.

La définition du contact entre la plaque et la gueuse et la modélisation d'un pré serrage sur les vis M5 permet d'améliorer les résultats SRC dans certains des cas étudiés, avec plus de 90% des valeurs dans l'intervalle des +/-3dB des résultats expérimentaux pour les accéléromètres sur la gueuse. Néanmoins, les résultats SRC peuvent être très variables en fonction de certains paramètres (pas de temps de calcul lors du choc, pas de temps d'archivage, masse de la bille et donc effort au contact, etc.) dû au comportement instable de l'algorithme de contact. En effet, comme on peut le constater sur un cas de rondelles thermiques isolantes à l'interface grâce à la Figure 6, les résultats avec contact et pré-serrage ne sont pas ceux attendus. Le modèle sans la définition du contact entre la plaque et la gueuse s'avère donc plus robuste, pour des résultats qui restent dans les conditions d'acceptabilité choisies. Deux exemples sont montrés dans la partie suivante. 4.3.



	Avec contact et pré-serrage	Sans contact ni pré-serrage
+/-3 dB	53.8%	88.0%
+/-4 dB	66.6%	93.8%

Figure 6 - Comparaison SRC accéléromètre sur plaque avec et sans modélisation du contact et du pré-serrage – Tableau des pourcentages de valeurs numériques dans l'intervalle concerné par rapport aux valeurs d'essais

Pour conclure, avec la modélisation simple sans la définition d'un contact, ni de pré-serrage, avec la configuration de surépaisseurs d'usinage pour la gueuse (zone de contact réduite à la zone de fixation), voici un exemple de corrélation SRC avec un accéléromètre sur la gueuse (cf. Figure 7).

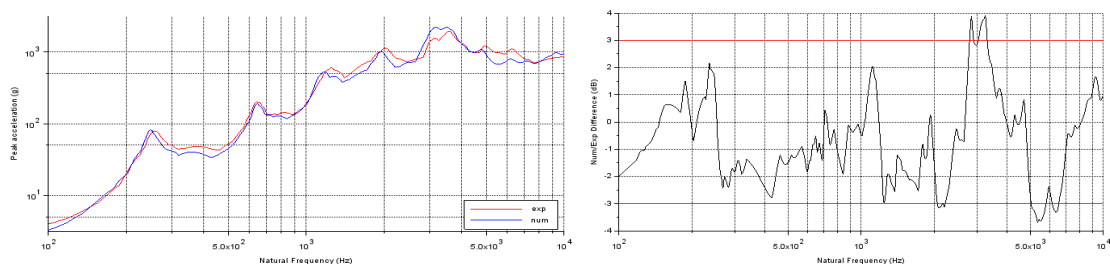


Figure 7 - Comparaison SRC accéléromètre sur gueuse et différence en dB entre numérique et expérimental – avec zone de contact entre la gueuse et la plaque réduite à la zone de fixation entre les pièces

### 4.3 Influence des choix de modélisation sur l'optimisation de paramètres

Le choix en lui-même, de définir dans le modèle un contact et un pré-serrage entre la gueuse et la plaque, a une influence sur l'optimisation de certains paramètres et la variabilité des résultats SRC en sortie. Il s'avère qu'en ne définissant pas de contact ni de pré-serrage, le modèle est simplifié, la variabilité des résultats SRC est moindre en fonction de l'évolution des paramètres de la modélisation. Ainsi, le modèle est plus robuste, les paramètres de modélisation peuvent être mieux optimisés, et les résultats restent dans les conditions d'acceptabilité choisies.

#### 4.3.1 Le pas de temps de calcul au moment du choc

Constatons pour le pas de temps de calcul au moment du choc, qu'avec la définition du contact et du pré-serrage, les résultats SRC sont hétérogènes (Figure 8 à gauche), tandis que, sans leurs définitions, les résultats SRC sont identiques (Figure 8 à droite), peu importe le pas de temps de calcul au moment du choc utilisé :

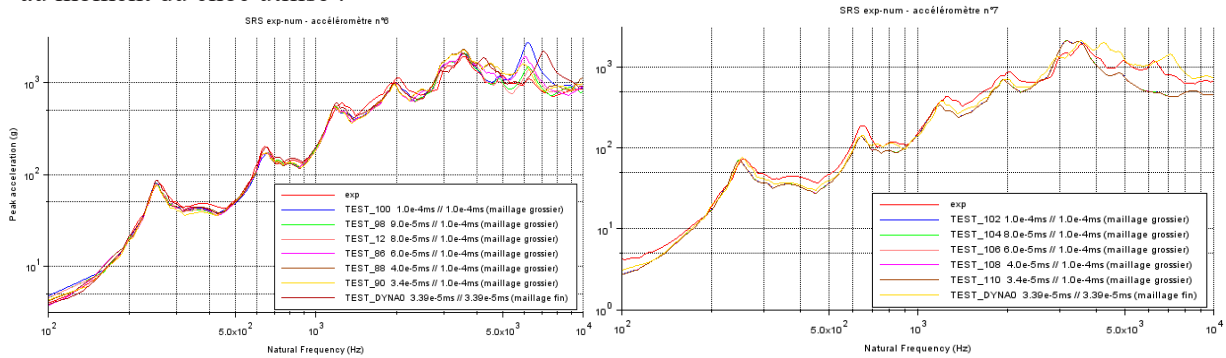


Figure 8 – Comparaison SRC accéléromètre sur gueuse – avec (gauche) et sans (droite) contact et pré-serrage – influence du pas de temps lors du choc

#### 4.3.2 Le pas de temps d'archivage

En l'absence de modélisation du contact ni du pré-serrage entre la plaque et la gueuse, le pas de temps d'archivage maximal est de  $5 \times 10^{-3}$  ms (on constate des dégradations des résultats SRC pour les pas de temps supérieurs) (Figure 9). Avec la définition d'un contact entre la plaque et gueuse, ainsi qu'un pré-serrage des vis, le pas de temps d'archivage maximal est réduit à  $1 \times 10^{-3}$  ms (Figure 9). On cherche donc à comprendre comment le choix du pas de temps d'archivage pourrait agir de cette manière sur les résultats SRC et conclure vis-à-vis de son maximum.

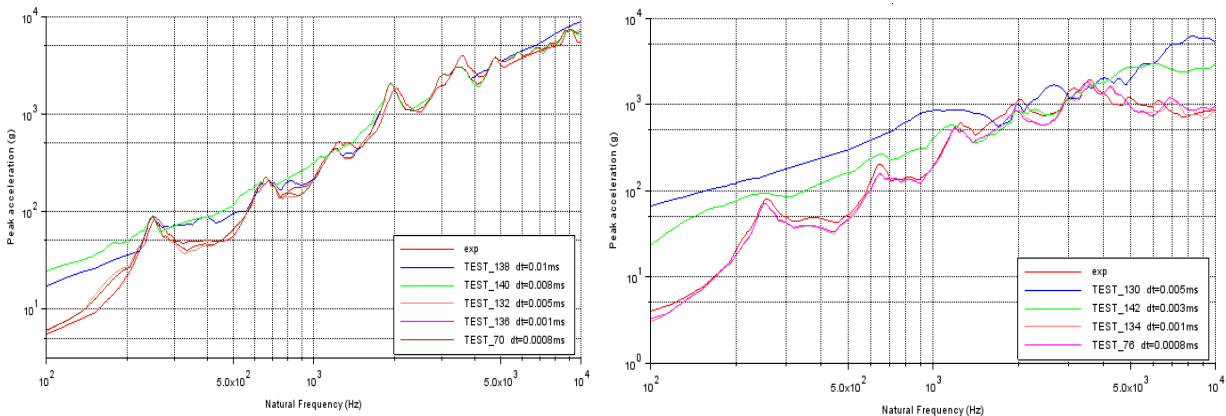


Figure 9 – Comparaison SRC accéléromètre sur gueuse - échantillonnage d'archivage – sans (gauche) et avec (droite) contact et pré-serrage

## 5 Conclusion

Pour conclure, de par la mise en place de ces essais plutôt simples, et la comparaison aux modèles numériques, liée avec un ensemble d'études paramétriques, nous avons pu réaliser une première approche pour le développement de méthodes et d'outils pour la prédiction des niveaux de chocs SRC dans les structures satellites. Par la suite, il est prévu de complexifier les cas avec une plaque plus complexe et de modéliser des essais réalisés avec les générateurs portatifs de choc pyrotechniques (PyroShockGun, PSG) du CNES. Actuellement, un état de l'art des méthodes de modélisation des chocs mécaniques, ainsi que des problématiques et des besoins dans ce domaine, est en cours de réalisation pour orienter le sujet de la thèse.

En perspective, il est envisagé d'étudier la modélisation des sources de chocs, les méthodes et outils pour la modélisation des structures, de la propagation et de la transmission des chocs pour prédire les niveaux de chocs en essai, puis en vol. En effet, comme l'explique l'article [6] sur la recherche technologique de connexion et de séparation à faible choc non pyrotechnique, les chocs pyrotechniques sont assez complexes, difficilement répétables et leur utilisation rend d'autant plus complexe la prédiction des niveaux de chocs en essai, ou en vol. Dans cet article, des systèmes non pyrotechniques sont présentés afin de s'affranchir dans un premier temps de cette complexité.

Il existe d'autres objectifs comme établir des critères de dimensionnement aux chocs, qui permettraient ainsi de prédire la tenue du système aux chocs dans son usage nominal et d'étudier différentes méthodes de post-traitements autres que le SRC, telles que les courbes temporelles ou bien d'autres représentations fréquentielles. Une récente introduction à une nouvelle méthode de post-traitement publiée par la NASA semble être intéressante à explorer par la suite [7].

## 6 Références

- [1] ECSS Secretariat – ESA-ESTEC - Requirements & Standards Division, *Space Engineering - Spacecraft Mechanical Loads Analysis Handbook*, ECSS-E-HB-32-26A, 2013
- [2] ECSS Secretariat – ESA-ESTEC - Requirements & Standards Division, *Space Engineering - Mechanical Shock Design and Verification Handbook*, ECSS-E-HB-32-25A, 2015
- [3] S. MARY, V. CIPOLLA, E. COURAU, J.-N. BRICOUT, *Shock Propagation Simulation Using FEM Software*, CNES, 2005
- [4] R.C. FEREBEE, J. CLAYTON, D. ALLDREDGE, T. IRVINE, *An Alternative Method of Specifying Shock Test Criteria*, NASA, 2008
- [5] P.-A. GUIDAULT, M.-F. SOULE De LAFONT, P.-A. BOUCARD, *Identification of A Finite Element Connector for The Simulation of Bolted Joints*, LMT - Cachan, 11th World Congress on Computational Mechanics, 2014.
- [6] H. YUE, Y. YANG, F. YANG, J. WU, Q. RUAN, Z. DENG, *Research Progress of Space Non-pyrotechnic Low Shock Connection and Separation Technology (SNLT): A Review*, State Key Laboratory of Robotics and System, Chinese Journal of Aeronautics, 2022
- [7] D. S. KAUFMAN, A. MAJED, *New Transient Finite Energy Shock Prediction Methodology*, NASA, 2023