

# Prédiction par essais virtuels de l'amortissement dans les structures spatiales

Alain Caignot, Pierre Ladevèze, David Néron

► **To cite this version:**

Alain Caignot, Pierre Ladevèze, David Néron. Prédiction par essais virtuels de l'amortissement dans les structures spatiales. 8e Colloque national en calcul des structures, May 2007, Giens, France. <hal-01490623>

**HAL Id: hal-01490623**

**<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01490623>**

Submitted on 15 Mar 2017

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

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

Public Domain}

---

# Prédiction par essais virtuels de l'amortissement dans les structures spatiales

**Alain Caignot—Pierre Ladevèze\* —David Néron**

*LMT-Cachan*

*ENS Cachan/CNRS UMR8535/Université Paris 6*

*61 avenue du Président Wilson*

*F-94235 Cachan CEDEX - FRANCE*

*caignot@lmt.ens-cachan.fr*

*\* Chaire de la Fondation EADS « Advanced Computational Structural Mechanics »*

---

*RÉSUMÉ. La modélisation et l'identification de l'amortissement font partie des enjeux majeurs du dimensionnement des structures, tout particulièrement pour les applications de haute technologie, comme la conception des lanceurs spatiaux. Le challenge de cette étude est de proposer une stratégie de calcul permettant de prédire l'amortissement dû aux liaisons là où les codes de calcul standards sont trop lents ou trop imprécis. Pour cela, une nouvelle méthode de calcul, basée sur la méthode LATIN dans sa version multiéchelle, est utilisée. Cette étude est réalisée en collaboration avec ASTRIUM-ST et le CNES et la faisabilité de la méthode est démontrée sur une liaison du lanceur ARIANE 5. L'amortissement calculé numériquement est comparé aux résultats expérimentaux et montre des résultats prometteurs.*

*ABSTRACT. The modeling and identification of damping have become major issues in the dimensioning of structures, especially in advanced technology industry, such as design of space launch vehicles. The challenge of this study is to propose a virtual testing strategy to predict the damping due to the joints which are present in a structure while engineering finite element codes do not give satisfactory results because they are either too slow or unable of computing dissipation accurately. To do that, a new computational tool, based on the Large Time INcrement (LATIN) method in its multiscale version, is used. This study is performed in collaboration with ASTRIUM-ST and CNES and the capability of the strategy is exemplified on one of the joints of ARIANE 5 launcher. The damping which is virtually predicted is compared to the experimental results, showing a promising accuracy.*

*MOTS-CLÉS : amortissement; liaisons; multiéchelle; parallélisme; stratégie de calcul*

*KEYWORDS: damping; connections; multiscale; parallel computing; computational strategy*

---

## 1. Introduction

La modélisation et l'identification de l'amortissement est un enjeu majeur dans le dimensionnement des structures, essentiellement dans le domaine des hautes technologies. Comme l'amortissement dans les matériaux est maintenant assez bien connu (Ibrahim *et al.*, 2005), le véritable challenge de cette étude est de proposer un outil permettant de prédire l'amortissement dans les liaisons. Ce travail se restreint au domaine des basses fréquences et concerne les liaisons utilisées dans le domaine spatial.

L'idée est de disposer d'une base de données regroupant l'amortissement de chacun des types de liaisons de manière adimensionnée, par mode et par type de sollicitation. À partir des efforts généralisés issus d'un premier calcul de la structure, il sera alors possible de rajouter une valeur d'amortissement prédictive puis de refaire le calcul complet de la structure. La difficulté pour construire une telle base de donnée est d'effectuer des simulations avec beaucoup de surfaces de contact et de paramètres, ce que les codes de calculs standards ne permettent pas toujours de faire. C'est pourquoi nous proposons d'utiliser une approche alternative, basé sur la méthode LATIN dans sa version multiéchelle (Ladevèze, 1999, Ladevèze *et al.*, 2007).

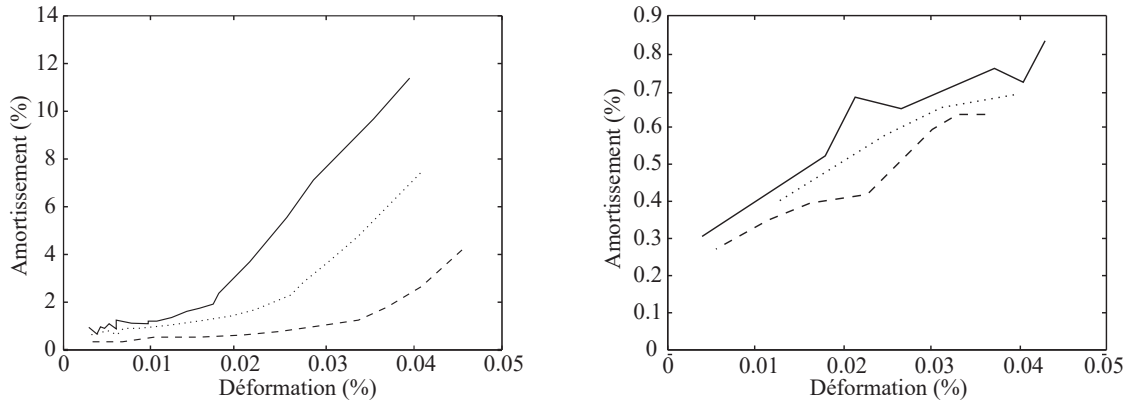
## 2. Prédiction de l'amortissement avec un essai expérimental

L'objet de cette partie est de rappeler les moyens expérimentaux originaux qui ont été mis en œuvre pour mesurer l'amortissement de différents éléments de la structure du SYLDA 5 (système de lancement double du lanceur ARIANE 5) et qui vont servir de référence aux essais virtuels qui seront décrits dans la suite. La principale difficulté d'un tel travail est de pouvoir mesurer l'amortissement d'une éprouvette sans que le résultat soit pollué par le montage expérimental. Ces travaux ont été présentés dans (Caignot *et al.*, 2005) et seuls les principaux résultats sont rappelés ici.

Les éprouvettes à caractériser ont été produites par EADS-Astrium Friedrichshafen et sont représentatives de différentes parties du SYLDA 5 : éprouvettes en matériaux composites, éprouvettes avec une liaison collée, liaison collée avec renfort et liaison boulonnée (liaison SSS, figure 3.2). Ces éprouvettes sont testées sur un montage de flexion quatre points, de tel sorte que la partie utile soit sollicitée en flexion pure à des niveaux d'effort caractéristiques de ceux du vol. De façon à minimiser l'amortissement induit par le montage, les liaisons pivots du montage sont des liaisons élastiques. Les mesures sont réalisées à l'aide de jauges de déformation. Divers moyens d'excitation ont été utilisés : un essai de lâché (en chargeant la liaison avec un câble en acier jusqu'à la rupture de celui-ci, pour avoir des vibrations libres) et un essai par pot vibrant pour les vibrations forcées.

Les principaux résultats sont les suivants. Pour ce qui est des éprouvettes en matériaux composites, l'amortissement mesuré est de 0,3%, ce qui est très proche des valeurs théoriques de 0,2% développées dans (Adams *et al.*, 1994, Maheri *et al.*, 1995). Les liaisons collées n'apportent pas d'amortissement supplémentaire.

Pour les liaisons boulonnées, le fait que l'amortissement est non linéaire en fonction du niveau est un phénomène connu et a été mis en évidence dans les essais. L'amortissement varie de 0,5% à 8% (figure 1(a)) et un phénomène de rodage a également été mis en évidence. L'amortissement diminue assez fortement quand le nombre de cycles à haut niveau augmente. En revanche, l'amortissement est très peu dépendant de la fréquence (figure 1(b)).



(a) Amortissement en fonction de la déformation ([—] 1er essai, [...] 15e essai, [- - -] après 40000 cycles)

(b) Influence de la fréquence d'excitation ([—] 13.5 Hz, [...] 17 Hz, [- - -] 23 Hz)

**Figure 1.** Amortissement de la liaison SSS

### 3. Prédiction de l'amortissement avec un essai numérique

La méthode de prédiction de l'amortissement proposée dans la section précédente, nécessite de tester chaque liaison pour chaque cas de charge, ce qui conduit à des coûts d'étude prohibitifs. L'objectif est maintenant de pouvoir retrouver les résultats précédents avec un calcul numérique.

#### 3.1. Prise en compte des phénomènes dissipatifs

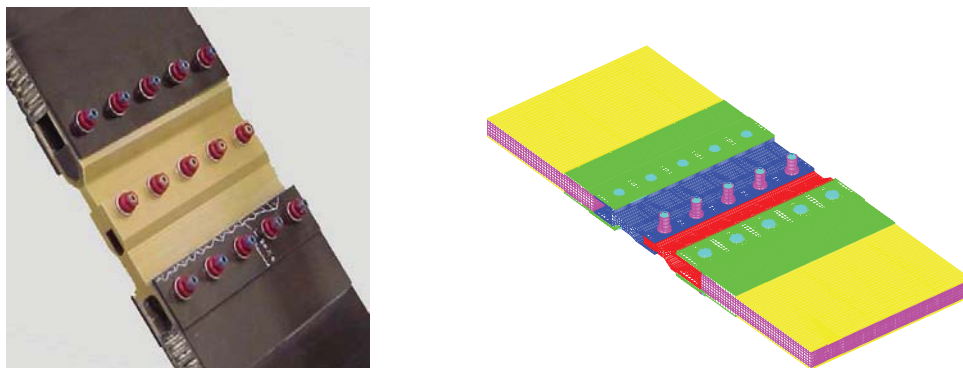
À l'heure actuelle, les phénomènes dissipatifs dans les liaisons boulonnées sont relativement bien connus et ils sont dans notre cas essentiellement dûs au frottement (Ibrahim *et al.*, 2005). L'énergie dissipée dans les liaisons boulonnées dépend du régime de glissement et des différents paramètres gérant le contact entre les pièces. Les dissipations plastiques sont négligeables dans les liaisons étudiées. Dans la liaison SSS, la rugosité moyenne est de l'ordre de 0,003 mm et pour les cas de charge retenus, les déplacements relatifs moyens sont de l'ordre de 0,02 à 0,1 mm dans les zones de glissement. Ce dernier résultat nous conduit à supposer que le comportement des surfaces de contact peut être décrit par la loi de Coulomb classique. Cependant,

des modèles de frottement plus complexes pourraient être mis en place si nécessaire (LuGre (N. Barabanov, 2000), Dahl (Dahl, 1976)...).

### 3.2. Modélisation de la liaison SSS

On utilise ici une méthode de décomposition de domaine mixte basée sur la méthode LATIN (Ladevèze, 1999). Cette méthode a d'abord été introduite dans le cadre des structures faiblement hétérogènes, puis dans celui des structures fortement hétérogènes, éventuellement avec contacts et, plus récemment, avec une technique d'homogénéisation à la fois en temps et en espace. Pour plus de détails, le lecteur peut se référer à (Ladevèze *et al.*, 2007).

Le maillage complet de la liaison, qui contient 1,3 million de degrés de liberté est représenté sur la figure 2. La simulation de ce problème est très coûteuse car le modèle compte 60 interfaces, dont 16 de contact avec frottement. Les liaisons aux extrémités sont boulonnées collées, les interfaces entre les différentes pièces sont alors considérées parfaites. Seule la partie centrale possède des interfaces de contact avec frottement, ainsi que toutes les têtes de vis et les écrous sur les différentes plaques ainsi que les tiges de vis dans les trous des plaques. Une des extrémités de la liaison est encastree et sur l'autre est imposé un chargement permettant d'imposer de la flexion pure. Ce moment de flexion suit l'évolution suivante : de 0 à 1 s, il est nul, ce qui permet de mettre la précharge dans les boulons, et de 1 à 4 s, il suit une évolution en triple demi-sinus.



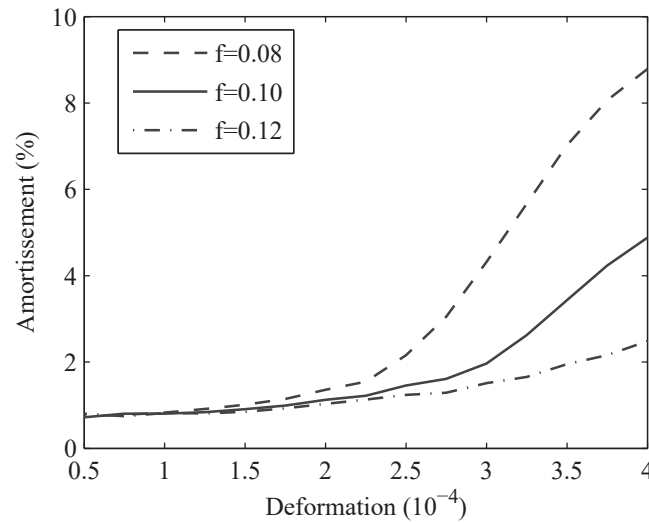
**Figure 2.** La liaison SSS et son maillage

### 3.3. Calcul de la liaison SSS

Le calcul est réalisé en quasi-statique, ce qui se justifie par le fait que nous ne considérons que des basses fréquences ainsi la taille des longueurs d'onde est largement supérieure à la dimension de la liaison.

L'amortissement, calculé sur le dernier cycle de chargement pour différentes valeurs maximales de moment, est présenté sur la figure 3 pour des valeurs de coefficient de frottement comprises entre 0,08 et 0,12 qui sont des valeurs standards pour le couple de matériaux en présence. La forme des résultats numériques est très proche

des résultats expérimentaux de la figure 1(a). Il semble que le rodage puisse être pris en compte par l'intermédiaire d'une évolution adaptée du coefficient de frottement.



**Figure 3.** Amortissement de la liaison SSS

La stratégie a été implantée dans un code de calcul programmé en C++, basé sur une plateforme informatique développé au LMT-Cachan. Le code de calcul utilisé a été parallélisé de manière à diminuer significativement les temps de calcul. En utilisant un cluster d'Opteron<sup>TM</sup>, le temps de calcul nécessaire pour générer une des courbes de la figure 3 reste de 15h.

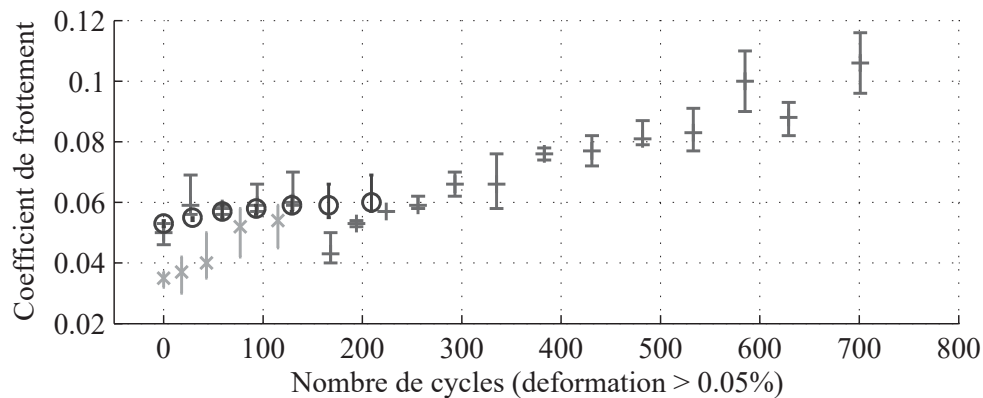
### 3.4. Identification du coefficient de frottement

Les calculs précédents ont permis d'obtenir la valeur de l'amortissement en fonction du coefficient de frottement et de la déformation. La connaissance du frottement dans cette étude étant limité, il reste maintenant à simuler l'essai expérimental à partir de ces résultats afin de l'identifier pour chacun des essais. Les résultats sont présentés sur la figure 4 pour l'ensemble des essais effectués sur les trois éprouvettes de la liaison SSS à notre disposition. La barre d'erreur représente l'incertitude commise sur l'identification si l'on fait varier le minimum de 5%. Le nombre de cycles représente le nombre de cycles où le niveau a dépassé les  $0,5 \cdot 10^{-4}$  en déformation. On constate que le coefficient de frottement ainsi identifié varie entre 0,05 et 0,12, ce qui représente des valeurs tout à fait standards pour le couple de matériaux en présence.

Dans le cadre d'une prédiction classique, le coefficient de frottement sera une donnée du problème, obtenue à partir d'essais élémentaires sur des éprouvettes de référence.

## 4. CONCLUSION

Cette première étude a permis de mettre en évidence la faisabilité de la prédiction de l'amortissement en prenant uniquement en compte les frottements « macro-



**Figure 4.** Identification du coefficient de frottement en fonction du nombre de cycles ((+) éprouvette 1, (o) éprouvette 2, (x) éprouvette 3)

scopiques » au travers de la loi de Coulomb. Les résultats obtenus avec les essais virtuels montrent une bonne corrélation avec les résultats d'essais expérimentaux, ce qui constitue une avancée majeure pour la prédiction de l'amortissement dans les structures. L'ensemble de ces travaux s'extrapole bien entendu à tous types de liaisons qui présentent des dissipations importantes.

Une étude complémentaire en cours consiste à améliorer la vitesse de calcul (gestion de la mémoire, parallélisme) afin de permettre l'utilisation de la méthode dans un cadre industriel.

## 5. Bibliographie

- Adams R. D., Maheri M. R., « Dynamic flexural properties of anisotropic fibrous composite beams », *Composites Science and Technology*, vol. 50, p. 497-514, 1994.
- Caignot A., Ladevèze P., Néron D., Le Loch S., Le Gallo V., Ma K., Romeuf T., « Prediction of damping in space launch vehicles using a virtual testing strategy », *Proc. of 6th International Symposium on Launcher Technologies, Munich*, 2005.
- Dahl P., « Solid friction damping of mechanical vibrations », *AIAA Journal*, vol. 14, p. 1675-1682, 1976.
- Ibrahim R. A., Pettit C. L., « Uncertainties and dynamic problems of bolted joints and other fasteners », *Journal of Sound and Vibration*, vol. 279, p. 857-936, 2005.
- Ladevèze P., *Nonlinear Computational Structural Mechanics – New Approaches and Non-Incremental Methods of Calculation*, Springer Verlag, 1999.
- Ladevèze P., Néron D., Gosselet P., « On a mixed and multiscale domain decomposition method », *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 196, p. 1525-1540, 2007.
- Maheri M. R., Adams R. D., « Finite-element prediction of modal response of damped layered composite panels », *Composites Science and Technology*, vol. 55, p. 13-23, 1995.
- N. Barabanov R. O., « Necessary and sufficient conditions for passivity of the LuGre model », *IEEE Trans. Autom. Cont.*, 2000.