



**HAL**  
open science

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

David Néron, Pierre Ladevèze, Alain Caignot, Naima Moustaghfir,  
Jean-François Durand

► **To cite this version:**

David Néron, Pierre Ladevèze, Alain Caignot, Naima Moustaghfir, Jean-François Durand. Prédiction par essais virtuels de l'amortissement dans les structures spatiales. 9e Colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2009, Giens, France. hal-01408403

**HAL Id: hal-01408403**

**<https://hal.science/hal-01408403>**

Submitted on 4 Dec 2016

**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

David Néron<sup>1</sup>, Pierre Ladevèze<sup>1,3</sup>, Alain Caignot<sup>1</sup>,  
Naima Moustaghfir<sup>1</sup> et Jean-François Durand<sup>2</sup>

<sup>1</sup> LMT-Cachan  
(ENS Cachan / CNRS / UPMC / PRES UniverSud Paris)  
61 avenue du Président Wilson, 94235 Cachan Cedex

<sup>2</sup> ASTRIUM-ST  
Launchers & ATV Mechanical Engineering Structural Dynamics  
66 route de Verneuil, 78130 Les Mureaux

<sup>3</sup> EADS Foundation Chair "Advanced Computational Structural Mechanics"

---

**Résumé** — La maîtrise de l'amortissement est une problématique majeure dans le dimensionnement des lanceurs spatiaux. Ce travail est consacré à la prédiction de l'amortissement dans le lanceur ARIANE 5 et se focalise sur les liaisons, dans lesquelles le frottement entre les différentes pièces de l'assemblage peut conduire à des dissipations non négligeables. L'objectif est ici de proposer une stratégie d'essais virtuels qui permettent de prédire ces dissipations en limitant, voire en supprimant, les essais réels.

**Mots clés** — amortissement, essais virtuels, liaisons, LATIN, multiéchelle.

---

## 1 Introduction

La modélisation et l'identification de l'amortissement sont des problématiques majeures à prendre en compte lors du dimensionnement des structures. En effet, celui-ci peut influencer fortement sur la réponse dynamique, notamment lorsque l'on se rapproche des modes propres. Le phénomène d'amortissement intéresse donc particulièrement les industries de pointe comme celles liées aux lanceurs spatiaux. Ce travail est ainsi consacré à la prédiction de l'amortissement dans le lanceur ARIANE 5 et a été réalisé dans le cadre du programme R&T CNES *Launchers damping prediction* et réalisé en collaboration avec ASTRIUM-ST. Le calcul de l'amortissement dans les matériaux (métalliques et composites) étant déjà bien maîtrisé, c'est sur les liaisons que se focalise l'étude. En effet, dans les liaisons, le frottement entre les différentes pièces des assemblages peut conduire à des dissipations non négligeables [1]. Par conséquent, l'objectif est de proposer une stratégie d'essais virtuels qui permettent de prédire ces dissipations en limitant, voire en supprimant, les essais réels.

L'approche consiste en un calcul numérique d'un modèle possédant la majeure partie des mécanismes de la liaison réelle. Dans ce modèle, les contacts entre les différentes pièces de l'assemblage sont décrits par la loi de frottement de Coulomb. La difficulté principale d'une telle simulation est le très grand nombre de surfaces de contact et de paramètres qui doivent être pris en considération pour prévoir les dissipations (jeux, précontraintes, coefficient de frottement, chargement, géométrie...). Dans ce cadre, les codes éléments finis industriels ne donnent pas de résultats

satisfaisants, soit à cause de leur lenteur, soit parce qu'ils ne permettent pas de calculer les dissipations avec suffisamment de précision. Par conséquent, nous proposons une approche alternative, basée sur la méthode LATIN [2] dans sa version multiéchelle en espace, qui utilise une procédure itérative impliquant la résolution de problèmes à une échelle raffinée « micro » et à une échelle homogénéisée « macro ». Cette stratégie a été implantée de façon à tirer parti des ordinateurs à architecture parallèle [3, 4].

## 2 Liaisons étudiées

Les liaisons étudiées font partie du SYLDA 5, le système permettant au lanceur ARIANE 5 de lancer deux satellites lors d'un même tir. Seuls les résultats concernant les liaisons boulonnées qui relient les panneaux en matériau composite sandwich (Figures 1 et 2) sont présentés dans ce document, mais différentes géométries présentes dans le lanceur ont aussi été étudiées.

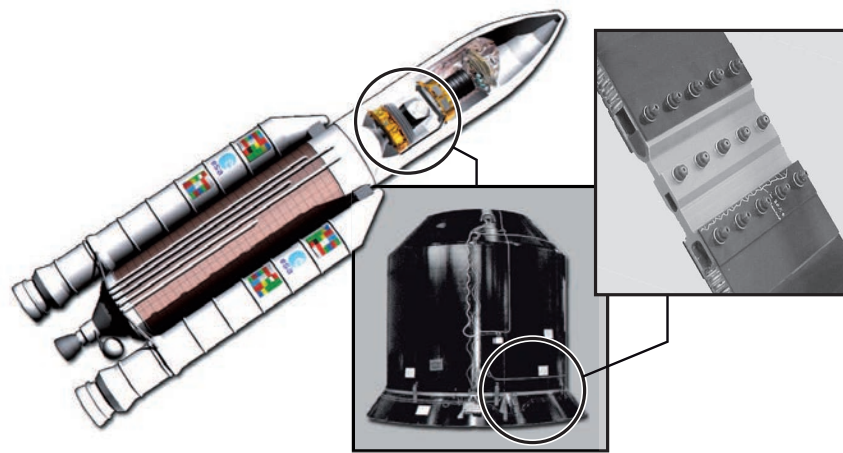


Figure 1 – Lanceur ARIANE 5, SYLDA 5 et liaison boulonnée (©ASTRIUM-ST)

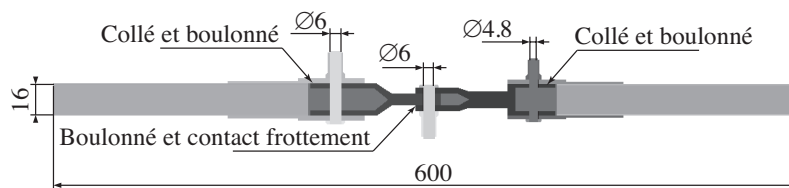


Figure 2 – Dimensions (mm) de la liaison boulonnée

L'amortissement dans ces liaisons avait déjà été déterminé lors d'un programme R&T précédent [5], mais de manière expérimentale. Pour cela, un montage original avait été mis en place pour tester les liaisons et identifier l'amortissement en limitant autant que possible les dissipations dues au montage lui-même. On avait notamment pu constater : (i) que l'amortissement variait fortement (de 0,5 % à plus de 10 %) avec le niveau de déformation ; (ii) qu'un phénomène de rodage apparaissait rapidement, conduisant à une diminution de l'amortissement avec le nombre de cycles subis par la liaison.

Les résultats alors obtenus ont servi à valider ceux générés à l'aide de l'approche virtuelle présentée dans la section suivante mais aussi à définir le domaine d'investigation (contrainte, fréquence, chargement).

### 3 Stratégie d'essais virtuels

#### 3.1 Phénomènes dissipatifs

Les phénomènes dissipatifs dans les liaisons sont bien connus. Dans notre cas, les dissipations sont essentiellement dues au frottement [1] (la dissipation plastique dans les matériaux étant négligeable). Ces dissipations dépendent du régime de glissement entre les parties de l'assemblage. On distingue ainsi trois types de glissements : macro, méso et micro. Les glissements macro et méso sont définis à l'échelle des mouvements relatifs visibles dans la liaison et sont régis par la loi de Coulomb classique. Les glissements micro sont définis à l'échelle de la rugosité de la surface et peuvent conduire à des dissipations sans qu'aucun mouvement relatif ne soit visible à l'échelle méso. Dans la liaison boulonnée étudiée, la rugosité moyenne est de l'ordre de  $0,2 \mu\text{m}$  et les cas de charges envisagés conduisent à des déplacements de l'ordre de  $0,02$  à  $0,1 \text{ mm}$  dans les zones de glissement. Ce constat valide l'utilisation du modèle de Coulomb, cependant l'implémentation de modèles de contact plus complexes (LuGre [6], Dahl [7]...) ne poserait pas plus de difficulté, tant que ces modèles restent locaux en espace. Si nécessaire, le calcul de l'énergie dissipée par micro-glissement peut être réalisé *a posteriori* [8].

La dissipation totale est obtenue par intégration sur l'ensemble des surfaces frottantes de la puissance dissipée localement. Pour cela, il est nécessaire de simuler précisément le comportement de la liaison. Un problème multi-contact de ce type peut conduire à des coûts de calcul prohibitifs, voire à l'échec du calcul si l'on utilise les outils industriels standards. C'est pourquoi une méthode de décomposition de domaine mixte, basée sur la méthode LATIN [2] a été employée. Seules les bases de la stratégie dans sa version multiéchelle en espace sont présentées ici. Pour plus de détails, on pourra se référer à [4].

#### 3.2 Méthode LATIN multiéchelle en espace

On s'intéresse au calcul quasi-statique (pour les modes dimensionnants du lanceur, la longueur d'onde est bien supérieure aux dimensions caractéristiques d'une liaison) d'une structure élastique  $\Omega$  dont l'état est défini par le couple de champs taux de déformation-contrainte  $(\dot{\epsilon}, \sigma)$  sur le domaine temps-espace  $[0, T] \times \Omega$ . Cette structure est soumise à des forces volumiques  $\underline{f}_d$ , des forces surfacique  $\underline{F}_d$  sur une partie  $\partial_2\Omega$  de la frontière  $\partial\Omega$  et à des déplacements imposés  $\underline{U}_d$  sur la partie complémentaire  $\partial_1\Omega$  (Figure 3).

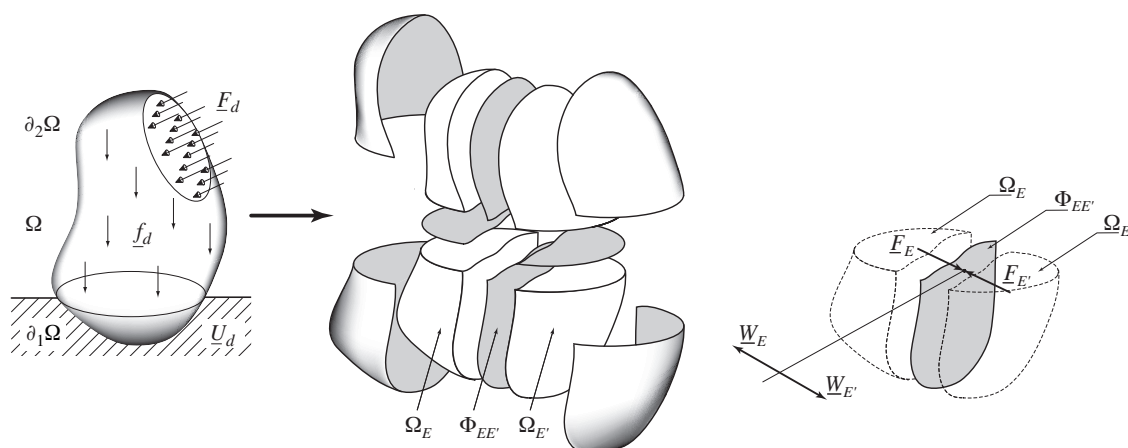


Figure 3 – Décomposition de la structure en sous-structures et interfaces

La structure est décomposée en sous-structures et interfaces possédant toutes leurs propres variables : (i) une sous-structure  $\Omega_E$  est définie par le couple  $(\dot{\epsilon}_E, \sigma_E)$ , restriction de  $(\dot{\epsilon}, \sigma)$  à  $\Omega_E$  ;

(ii) une interface  $\Phi_{EE'}$  entre deux sous-structures  $\Omega_E$  et  $\Omega_{E'}$  par les déplacements  $(\underline{W}_E, \underline{W}_{E'})$  et les forces  $(\underline{F}_E, \underline{F}_{E'})$  de part et d'autre de  $\Phi_{EE'}$ . Ces quantités doivent vérifier : (i) les équations dites « d'admissibilité », qui traduisent l'équilibre de  $(\dot{\underline{\epsilon}}_E, \underline{\sigma}_E)$  avec les champs adjacents  $(\dot{\underline{W}}_E, \underline{F}_E)$  ; (ii) le comportement des interfaces, qui s'écrit sous la forme  $\mathbf{b}_{EE'}(\dot{\underline{W}}_E, \dot{\underline{W}}_{E'}, \underline{F}_E, \underline{F}_{E'}) = 0$  où  $\mathbf{b}_{EE'}$  est un opérateur qui permettra de traduire un comportement « parfait » ( $\underline{W}_E - \underline{W}_{E'} = \underline{0}$  et  $\underline{F}_E + \underline{F}_{E'} = \underline{0}$ ) ou un comportement « frottant ».

Pour prendre en compte les aspects multiéchelles en espace (pour les aspects temporels, on pourra se référer à [3]), on sépare les variables d'interfaces en une partie « macro » et un complément « micro ». Par exemple, pour la sous-structure  $\Omega_E$ , les champs  $(\dot{\underline{W}}_E, \underline{F}_E)$  sont écrits :

$$\dot{\underline{W}}_E = \dot{\underline{W}}_E^M + \dot{\underline{W}}_E^m \quad \text{et} \quad \underline{F}_E = \underline{F}_E^M + \underline{F}_E^m$$

La partie macro  $\underline{F}_E^M$  correspond à une moyenne de  $\underline{F}_E$  et, en vertu du principe de Saint Venant, le complément microscopique  $\underline{F}_E^m$  n'a qu'un effet localisé en espace. Un aspect important de la stratégie est d'imposer la transmission *a priori* de la partie  $\underline{F}_E^M$  des efforts.

Le problème est alors résolu en utilisant la méthode LATIN [2] : on cherche la solution  $\mathbf{s} = (\dot{\underline{\epsilon}}_E, \dot{\underline{W}}_E, \underline{\sigma}_E, \underline{F}_E)_{\Omega_E \subset \Omega}$  alternativement dans deux espaces :

- l'espace  $\mathbf{A}_d$  des solutions des équations d'admissibilité des sous-structures qui vérifient en outre la transmission de la partie macro des efforts ;
- l'espace  $\Gamma$  des solutions des équations traduisant le comportement des interfaces.

en utilisant un schéma itératif dont chaque itération est constituée d'une « étape locale » et d'une « étape linéaire » (Figure 4).

$$\dots \longrightarrow \mathbf{s}_n \in \mathbf{A}_d \xrightarrow{\text{étape locale}} \hat{\mathbf{s}}_{n+1/2} \in \Gamma \xrightarrow{\text{étape linéaire}} \mathbf{s}_{n+1} \in \mathbf{A}_d \longrightarrow \hat{\mathbf{s}}_{n+3/2} \in \Gamma \longrightarrow \dots \longrightarrow \mathbf{s}_{\text{ref}}$$

\underbrace{\hspace{15em}}\_{\text{Itération } n+1}

Figure 4 – Les étapes locales et linéaires de la méthode LATIN

La Figure 5 propose une interprétation graphique de la méthode en montrant les ensembles  $\mathbf{A}_d$  et  $\Gamma$  dans l'espace généré par  $(\dot{\underline{\epsilon}}_E, \dot{\underline{W}}_E)_{\Omega_E \subset \Omega}$  et  $(\underline{\sigma}_E, \underline{F}_E)_{\Omega_E \subset \Omega}$  ainsi que les « directions de recherche »  $\mathbf{E}^+$  et  $\mathbf{E}^-$  qui sont introduites pour fermer le problème. Ces directions sont des paramètres de la stratégie et on peut montrer la convergence de celle-ci sous réserve de vérifier des critères simples sur les directions.

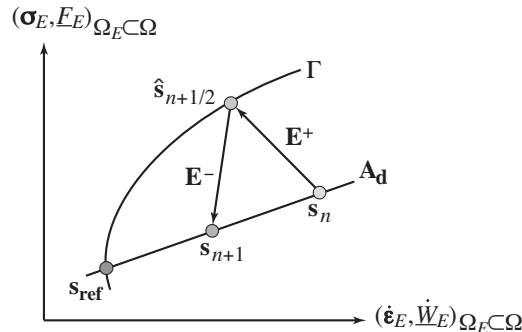


Figure 5 – Une itération de la méthode LATIN

La stratégie a été implantée dans un environnement dédié, écrit en C++. Le code de calcul a été baptisé JOINTVIRT et peut tirer parti des ordinateurs à architecture parallèle (que soient des clusters ou des machines à mémoire partagée).

## 4 Résultats

Le code est utilisé pour prédire l'amortissement dans la liaison boulonnée d'ARIANE 5 en calculant les dissipations par frottement lorsque celle-ci est sollicitée en flexion par un chargement en moment dont l'évolution est sinusoïdale (ce qui correspond aux conditions de chargement imposées lors des essais expérimentaux [5]). Le problème correspondant, ainsi que le maillage comprenant 1,3 million de degrés de liberté, sont représentés sur la Figure 6. L'amortissement est calculé pour un coefficient de frottement  $\mu$  variant de 0,08 à 0,14. La valeur la plus faible correspond aux données tribologique du fabricant du procédé utilisé pour traiter les surfaces en contact dans la liaison.

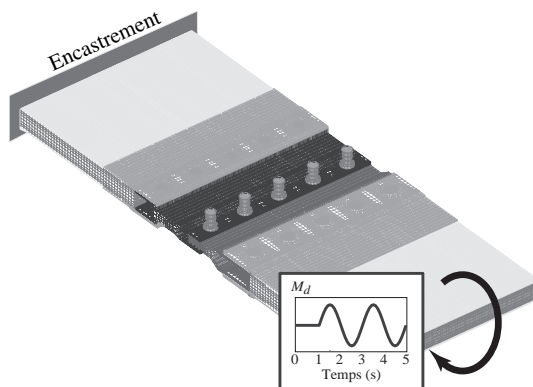


Figure 6 – Liaison boulonnée en flexion et maillage

La Figure 7 montre que l'allure des résultats numériques (a) est très proche de celle des résultats expérimentaux (b), ce qui signifie que le modèle de Coulomb est suffisant pour décrire le contact dans ce type de structure. On constate que le phénomène de rodage peut être modélisé par une évolution du coefficient de frottement. La connaissance de la loi d'évolution du coefficient de frottement en fonction du nombre de cycles permet donc de connaître totalement l'amortissement dans la liaison.

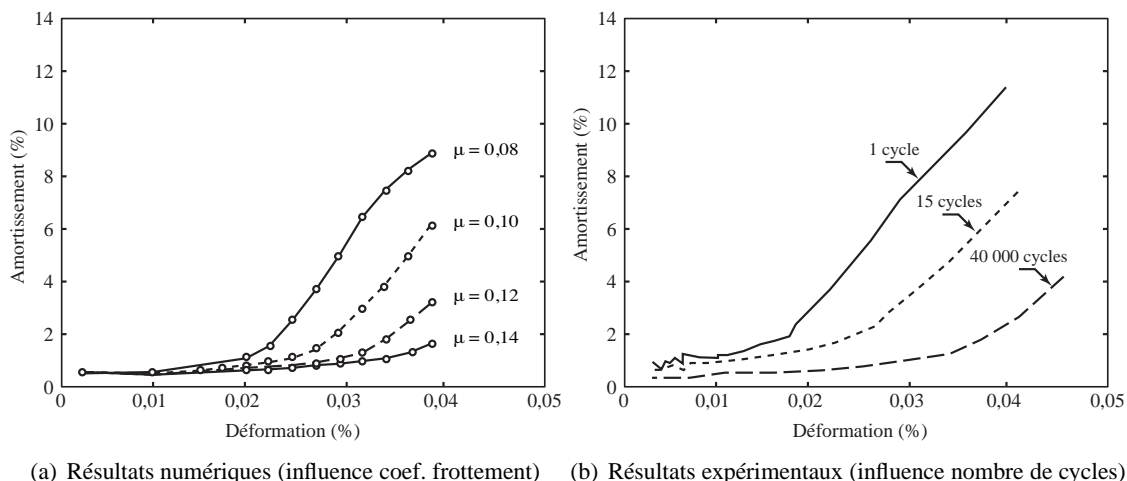


Figure 7 – Amortissement dans la liaison boulonnée vs. déformation

## 5 Conclusion

L'objectif de cette étude était de mettre en place une stratégie d'essais virtuels permettant de prédire l'amortissement dans les liaisons des lanceurs spatiaux. Pour cela, un nouvel outil, basé sur la méthode LATIN dans version multiéchelle spatiale, a été proposé. Il permet d'évaluer les dissipations dues au frottement dans des problèmes multi-contacts qui ne peuvent être traités à l'aide des codes de calculs industriels standards. Dans le présent document, cet outil a été utilisé pour prédire l'amortissement dans les liaisons boulonnées du lanceur ARIANE 5 et les valeurs obtenues sont en parfait accord avec les résultats expérimentaux qui avaient été obtenues dans une étude précédente, ce qui valide l'approche par essais virtuels. Il a en outre été montré que le modèle de frottement de Coulomb était suffisant pour prédire l'amortissement et que le phénomène de rodage pouvait être pris en compte par une loi d'évolution adaptée du coefficient de frottement en fonction du nombre de cycles.

Le code JOINTVIRT a été employé pour simuler d'autres types de liaisons que celles présentées (brides boulonnées à 45°, 90°, sangles...) et a été transféré chez ASTRIUM-ST où il est utilisé pour enrichir une base de données de l'amortissement dans les liaisons du lanceur.

## Références

- [1] R. A. Ibrahim and C. L. Pettit. Uncertainties and dynamic problems of bolted joints and other fasteners. *Journal of Sound and Vibration*, 279 :857–936, 2005.
- [2] P. Ladevèze. *Nonlinear Computational Structural Mechanics – New Approaches and Non-Incremental Methods of Calculation*. Springer Verlag, 1999.
- [3] P. Ladevèze and A. Nouy. On a multiscale computational strategy with time and space homogenization for structural mechanics. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 192 :3061–3087, 2003.
- [4] P. Ladevèze, D. Néron, and P. Gosselet. On a mixed and multiscale domain decomposition method. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 196 :1525–1540, 2007.
- [5] A. Caignot, P. Ladevèze, D. Néron, S. Le Loch, V. Le Gallo, K.M. Ma, and T. Romeuf. Prediction of damping in space launch vehicles using a virtual testing strategy. In *Proc. of 6th International Symposium on Launcher Technologies*, 2005.
- [6] R. Ortega N. Barabanov. Necessary and sufficient conditions for passivity of the lugre model. In *IEEE Trans. Autom. Cont.*, 2000.
- [7] P. Dahl. Solid friction damping of mechanical vibrations. *AIAA Journal*, 14 :1675–1682, 1976.
- [8] L. Gorbatikh and M. Popova. Modeling of a locking mechanism between two rough surfaces under cyclic loading. *International Journal of Mechanical Sciences*, 48(9) :1014–1020, 2006.