

# Prédiction par essais virtuels de l'amortissement dans les liaisons du lanceur ARIANE 5

N. Moustaghfir<sup>a</sup>, A. Caignot<sup>a</sup>, P. Ladevèze<sup>a,b</sup>, D. Néron<sup>a</sup>

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

<sup>b</sup>EADS Foundation Chair Advanced Computational Structural Mechanics

## Résumé :

*L'objectif de cette étude est de proposer une stratégie pour essais virtuels pour la prédiction de l'amortissement dû aux liaisons présentes dans la structure. Ce travail se restreint aux types de liaisons rencontrées en industrie spatiale, particulièrement dans le lanceur spatial ARIANE 5. La stratégie que nous développons ici est numérique et est basée sur la méthode LATIN dans sa version multiéchelle.*

## Abstract :

*The objective of this study is to propose a virtual testing strategy in order to predict the damping due to the joints, which are present in a structure. This work is restricted to the types of joints encountered in the space industry, particularly in the ARIANE 5 launcher. The strategy we developed is numerical and based on the Large Time Increment (LATIN) method in its multiscale version.*

**Mots clefs :** amortissement, essais virtuels, liaisons boulonnées, méthode 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 celle qui est liée aux lanceurs spatiaux.

Ce travail est consacré à la prédiction de l'amortissement dans le lanceur ARIANE 5, conçu par ASTRIUM-ST avec qui cette étude a été réalisée. Les dissipations dans les matériaux qui composent le lanceur étant relativement faibles, l'étude se focalise sur les liaisons, dans lesquelles le frottement entre les différentes pièces des assemblages peut conduire à des dissipations non négligeables. 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 de ce que nous appelons un « méso-modèle de liaison », 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 du commerce 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 multiéchelle, qui utilise une procédure itérative impliquant la résolution de problèmes à une échelle raffinée « micro » et à une échelle homogénéisée « macro » et est implantée de façon à tirer parti des ordinateurs à architecture parallèle.

L'efficacité de cette stratégie a été déjà illustrée à travers des exemples de liaisons réelles du lanceur ARIANE 5 (liaison SSS) [5]. Les valeurs de l'amortissement obtenues numériquement étaient en parfait accord avec les résultats expérimentaux, ce qui a validé l'approche par essais virtuels.

## 2 Les 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 de type « bride talon » sont présentés dans ce document : la bride talon à 90° (notée BT90°) et la bride talon à 45° (notée BT45°), voir FIG. 1.

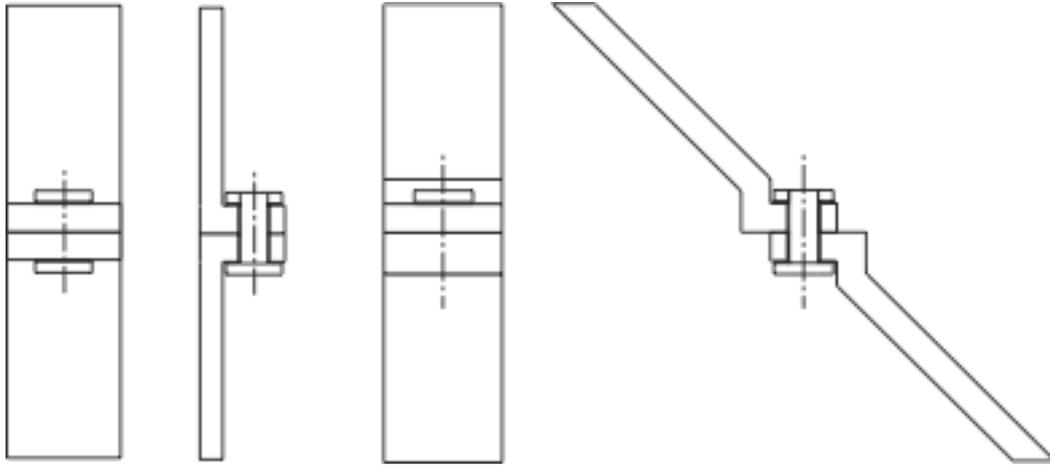


FIG. 1 - Brides talons à 90° et 45°.

## 3 Stratégie pour 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 ce travail, on se limite modèle de Coulomb, cependant l'implémentation de modèles de contact plus complexes (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  $\partial_1\Omega$  (FIG. 2).

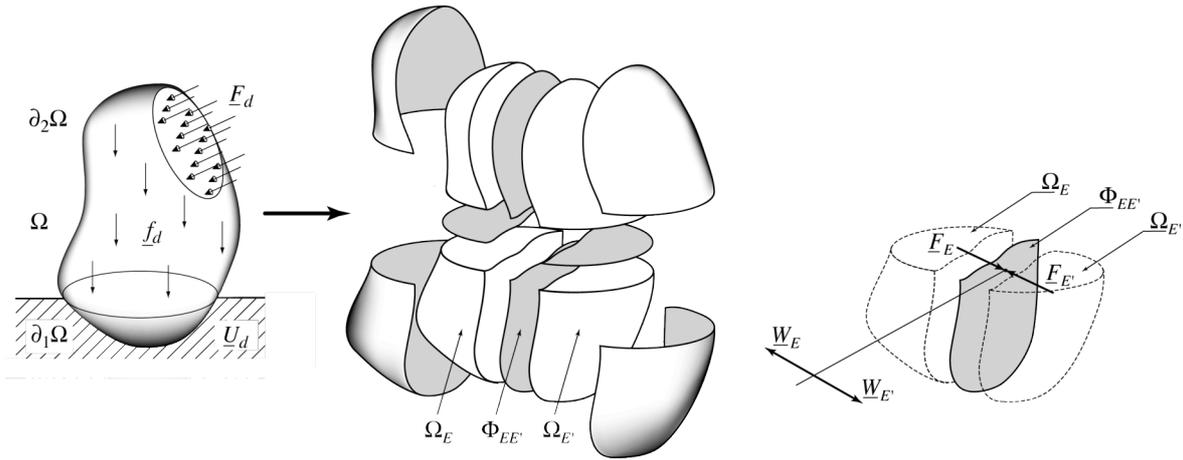


FIG. 2- Décomposition de la structure en sous-structures et interfaces.

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  $(\dot{\epsilon}_E, \sigma_E)$  avec les champs adjacents  $(\underline{\dot{W}}_E, \underline{F}_E)$ ; (ii) le comportement des interfaces, qui s'écrit sous la forme  $b_{EE'}(\underline{\dot{W}}_E, \underline{\dot{W}}_{E'}, \underline{F}_E, \underline{F}_{E'}) = 0$  où  $b_{EE'}$  est un opérateur qui permettra de traduire un comportement « parfait » ( $\underline{W}_E - \underline{W}_{E'} = 0$  et  $\underline{F}_E + \underline{F}_{E'} = 0$ ) 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  $(\underline{\dot{W}}_E, \underline{F}_E)$  sont écrits :

$$\underline{\dot{W}}_E = \underline{\dot{W}}_E^M + \underline{\dot{W}}_E^m \text{ et } \underline{F}_E = \underline{F}_E^M + \underline{F}_E^m \tag{1}$$

La partie macro  $\underline{F}_E^M$  correspond à une moyenne de  $\underline{F}$  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], ce qui consiste à chercher la solution  $s = (\dot{\epsilon}, \underline{\dot{W}}_E, \sigma_E, \underline{F}_E)_{\Omega_E \subset \Omega}$  alternativement dans deux espaces :

- l'espace  $A_d$  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 » (FIG. 3).

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

} itération n+1

FIG. 3 – Les étapes locales et linéaires de la méthode LATIN.

La figure (FIG. 4) propose une interprétation graphique de la méthode en montrant un ensemble  $A_d$  et  $\Gamma$  dans l'espace généré par  $(\dot{\epsilon}_E, \underline{\dot{W}}_E)_{\Omega_E \subset \Omega}$  et  $(\sigma_E, \underline{F}_E)_{\Omega_E \subset \Omega}$  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.

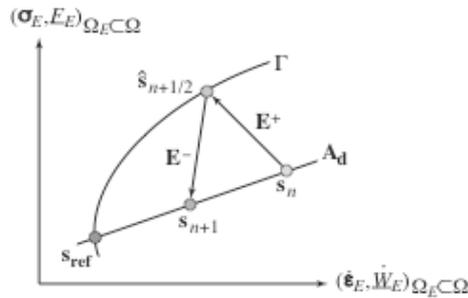


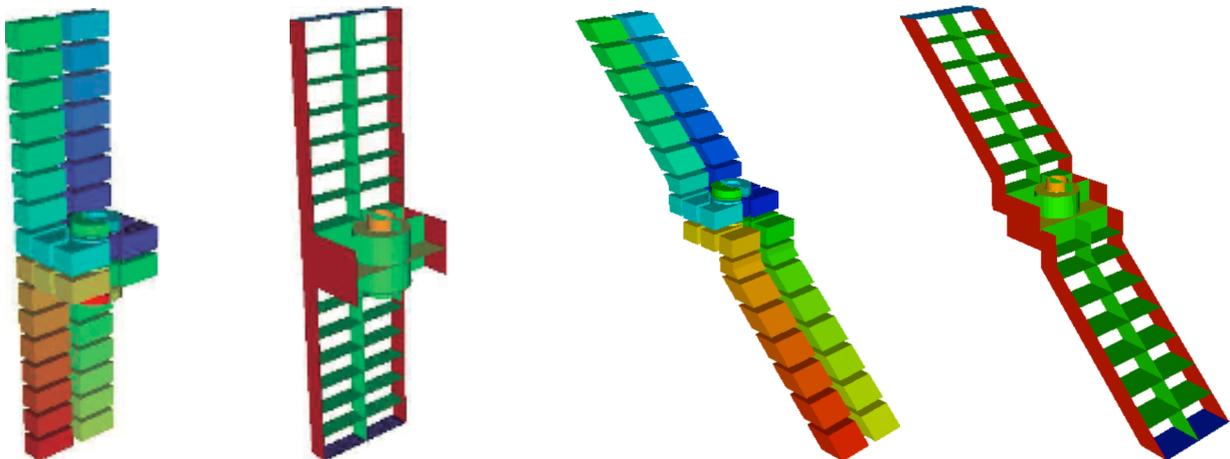
FIG. 4 – Une itération de la méthode LATIN.

La stratégie proposée est implantée dans un code de calcul écrit en C++, et a été validée pour différents cas d'analyses en utilisant le code commercial Abaqus. Le code a été baptisé JOINTVIRT et peut tirer parti des ordinateurs à architecture parallèle (clusters ou machines à mémoire partagée).

#### 4 Résultats

Ce code est utilisé pour prédire l'amortissement dans les liaisons boulonnées d'ARIANE 5 (BT90° et BT45°). L'amortissement est calculé pour un coefficient de frottement  $\mu$  égal à 0,08. Cette valeur correspond aux données tribologiques du fabricant du procédé utilisé pour traiter les surfaces en contact dans la liaison.

Pour les liaisons boulonnées du lanceur, on utilise un maillage simplifié, qui tient compte de symétrie afin de réduire le coût de l'analyse. Le maillage utilisé pour les deux liaisons boulonnées contient approximativement 275000 degrés de liberté.



(a) Sous-structures BT90°      (b) Interfaces BT90°      (c) Sous-structures BT45°      (d) Interfaces BT45°

FIG. 5 - Brides talon à 45° et à 90° : sous-structures et interfaces.

Le modèle est composé de 56 sous-structures et 126 interfaces (voir FIG. 5), dont 16 présentent du contact avec frottement. Deux types de sollicitations sont étudiés : un chargement statique de traction ou compression et chargement dynamique longitudinal ou de type cisaillement transverse dont l'évolution est sinusoïdale en temps.

Les figures FIG. 6 et FIG. 7 représentent l'évolution du facteur de perte en fonction des chargements dynamiques dans le cas des boulons soumis à une précharge de 400 MPa.

Le calcul est effectué simultanément sur 16 processeurs d'un Cluster d'Opteron et demande approximativement 7 heures de calcul pour la détermination d'un seul point de la courbe (facteur de perte  $\eta$  en fonction du chargement).

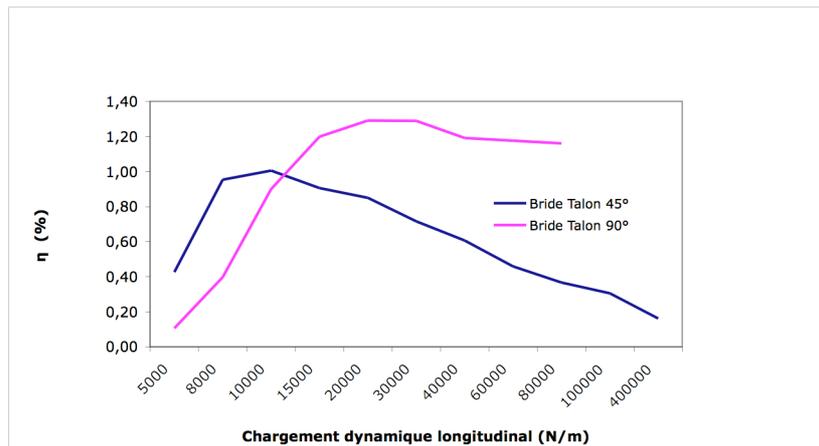


FIG. 6 - Evolution du facteur de perte de la bride sous un chargement dynamique longitudinal, chargement statique en compression 50 kN/m, précharge des boulons égale à 400 MPa.

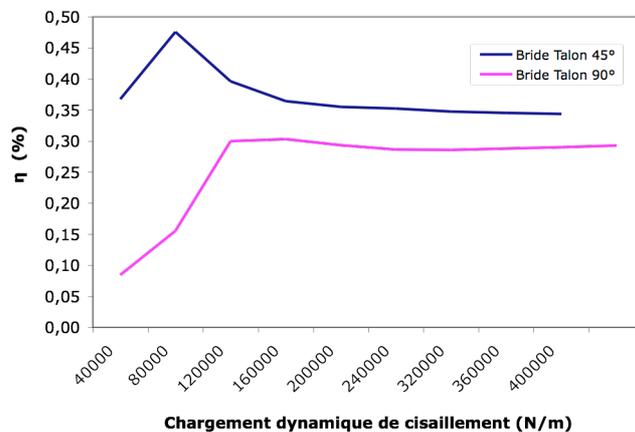


FIG. 7 – Evolution du facteur de perte de la bride sous un chargement dynamique de cisaillement transverse, chargement statique en compression 50 kN/m, précharge des boulons égale à 400 MPa.

Les courbes montrent que le facteur de perte varie de façon non linéaire avec le chargement et que les valeurs de  $\eta$  sont faibles lorsque le chargement dynamique est faible. Le facteur de perte atteint un niveau maximal plus important dans le cas d'un chargement dynamique de cisaillement que dans le cas d'un chargement longitudinal.

## 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 sa version multiéchelle en espace, a été proposé. Il permet d'évaluer les dissipations dues au frottement dans des problèmes multi-contacts qui ne peuvent pas 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, bride talon à 90° et bride talon à 45°, du lanceur ARIANE 5. Le code JOINTVIRT a été transféré chez ASTRIUM-ST où il est utilisé pour enrichir une base de données de l'amortissement dans les liaisons du lanceur et il est employé pour simuler d'autres types de liaisons (sangles).

## 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. *Proc. of 6th International Symposium on Launcher Technologies*, 2005.
- [6] R. Ortega N. Barabanov. Necessary and sufficient conditions for passivity of the lugre model. *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.