

Modèles réduits PGD pour les problèmes multicontacts paramétrés

M. Jesus, D. Néron, P. Ladevèze

LMT Cachan (ENS Cachan/CNRS/Université Paris-Saclay), {jessus, neron, ladeveze}@lmt.ens-cachan.fr

Résumé — Dans ces travaux, on s'intéresse à la construction de modèles réduits pour la simulation et l'optimisation de problèmes multicontacts paramétrés. Le cadre industriel est l'amélioration de la prédiction de l'amortissement dans les liaisons des lanceurs spatiaux et l'approche proposée est basée sur le virtual testing des liaisons. L'amortissement dans celles-ci est principalement dû aux dissipations dans les nombreux contacts frottants et un calcul précis de ces dissipations a nécessité l'utilisation d'une approche multiéchelle dédiée, notamment pour prendre en compte l'influence des paramètres (coefficient de frottement, précharge dans les boulons...). Une extension au traitement de matériaux et d'interfaces viscoplastiques est aussi en cours de développement car c'est une des voies qui est envisagées pour l'augmentation de l'amortissement dans les lanceurs.

Mots clés — réduction de modèles, PGD, LATIN, décomposition de domaine, contact.

1 Contexte industriel

Ces travaux sont réalisés dans le cadre du projet ANR ARIAN (AmoRtissement vIrtuel pour la conception vibroacoustique des lANnceurs futurs), réalisé en collaboration avec AIRBUS Defence & Space. Ce projet a pour objectif de franchir un pas décisif dans la mise en place d'une démarche numérique de prédiction de l'amortissement qui servira à accélérer la conception du futur lanceur spatial Ariane 6. L'idée développée ici consiste à construire un modèle réduit de l'amortissement dans les liaisons qui prend en compte l'influence des paramètres de conception et qui permettra d'explorer et d'optimiser simplement de nouvelles solutions plus amortissantes.

La modélisation de la réponse dynamique est en effet une des questions cruciales lors de la conception des lanceurs spatiaux. Cette réponse, qui intervient dans plusieurs problématiques majeures (pilotage, pogo, aéroelasticité et ambiance dynamique), est très fortement influencée par l'amortissement dans la structure. C'est pourquoi il est primordial de disposer d'outils permettant de garantir l'introduction de suffisamment de dissipations en jouant sur la conception des lanceurs. L'approche utilisée jusqu'à présent dans les bureaux d'études était peu précise puisque les coefficients n'étaient pas prédits mais introduits de manière forfaitaire dans les calculs de prédimensionnement des lanceurs avant d'être identifiés à partir d'essais de validation sur structure réelle.

Une R&T intitulée "Étude de l'amortissement des lanceurs", a regroupé AIRBUS Defense & Space, le CNES et le LMT-Cachan de 2000 à 2010 afin de concevoir un outil permettant la prédiction de l'amortissement dans le cadre industriel dès la phase de conception du lanceur. La problématique était de prendre en compte les phénomènes dissipatifs qui interviennent à une échelle microscopique (dans les matériaux au niveau des zones de contact frottants...) pour déterminer une grandeur macroscopique : l'amortissement modal dans la structure spatiale. Les aspects matériaux ayant déjà fait l'objet d'un certain nombre de travaux, la difficulté majeure était de calculer les dissipations dans les liaisons. Pour cela un outil spécifique de virtual testing, basé sur la méthode LATIN multiéchelle, a été mis en place et a permis de calculer avec précision, mais pour un coût encore élevé, les très faibles dissipations qui ont lieu dans une structure où le grand nombre de surfaces en contact met en échec les codes de calcul industriels standards. Les résultats numériques obtenus dans [1] ont montré une remarquable fidélité vis-à-vis des résultats expérimentaux mais aussi la très forte influence de certains paramètres (coefficient de frottement, précharge dans les boulons) sur lesquels portent pourtant de fortes incertitudes.

L'utilisation ici d'une approche de réduction de modèles basée sur la Proper Generalized Décomposition (PGD) permet à la fois de diminuer de façon drastique le temps de calcul, de construire des modèles réduits prenant en compte les aspects paramétriques, et ainsi de quantifier l'influence sur l'amortissement des méconnaissances qui portent sur certains des paramètres de conception en utilisant le cadre proposé dans [2].

2 Un problème multicontacts paramétré

Les problèmes typiques qu'il est nécessaire de simuler correspondent aux différents types de liaisons d'un lanceur. Les figures ci-dessous montrent par exemple le cas de la liaison boulonnée SSS qui équipe actuellement le lanceur Ariane 5. La quantité d'intérêt à déterminer est le coefficient d'amortissement η , donné par le ratio entre l'énergie dissipée ΔU et l'énergie imposée U sur un cycle de chargement de la liaison :

$$\eta = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta U}{U} \quad (1)$$

Ces deux quantités sont calculées par post-traitement des champs des contraintes et de déplacements dans la liaison et dépendent, comme mis en évidence dans [1], fortement d'un certain nombre de paramètres du problème. Pour calculer ces champs pour un jeu de paramètre donné, la stratégie de résolution est basée sur la méthode LATIN multiéchelle.

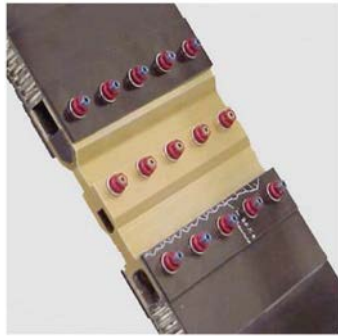


FIGURE 1 – Liaison réelle

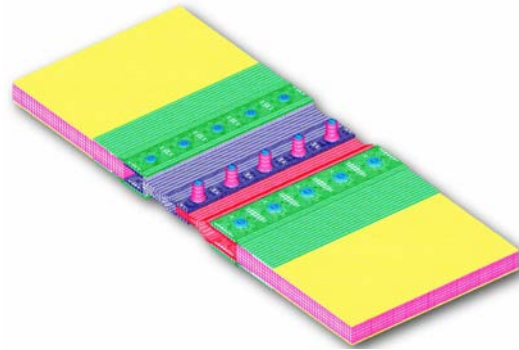


FIGURE 2 – Modèle numérique

Une des voies envisagées pour l'augmentation de l'amortissement dans les lanceurs est l'utilisation de matériaux viscoplastiques. Une extension au traitement d'interfaces et de matériaux viscoplastiques de type Marquis-Chaboche [3] est ainsi en cours de développement.

3 Méthode LATIN multiéchelle et réduction de modèles

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 Ω dont l'état est défini par le couple de champs taux de déformation plastique-contrainte $(\dot{\epsilon}_p, \sigma)$ 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 $\partial_1\Omega$ (cf. Figure 3).

3.1 Méthode LATIN multiéchelle

La structure est décomposée en sous-structures et interfaces possédant toutes leurs propres variables : (i) une sous-structure Ω_E est définie par le couple $(\dot{\epsilon}_{pE}, \sigma_E)$, restriction de $(\dot{\epsilon}_p, \sigma)$ à Ω_E ; (ii) une interface $\Phi_{EE'}$ entre deux sous-structures Ω_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 $(\dot{\epsilon}_{pE}, \sigma_E)$ avec les champs adjacents $(\underline{W}_E, \underline{F}_E)$; (ii) le comportement des interfaces, qui s'écrit formellement :

$$\mathbf{b}_{EE'}(\underline{W}_E, \underline{W}_{E'}, \underline{F}_E, \underline{F}_{E'}; \mu) = 0$$

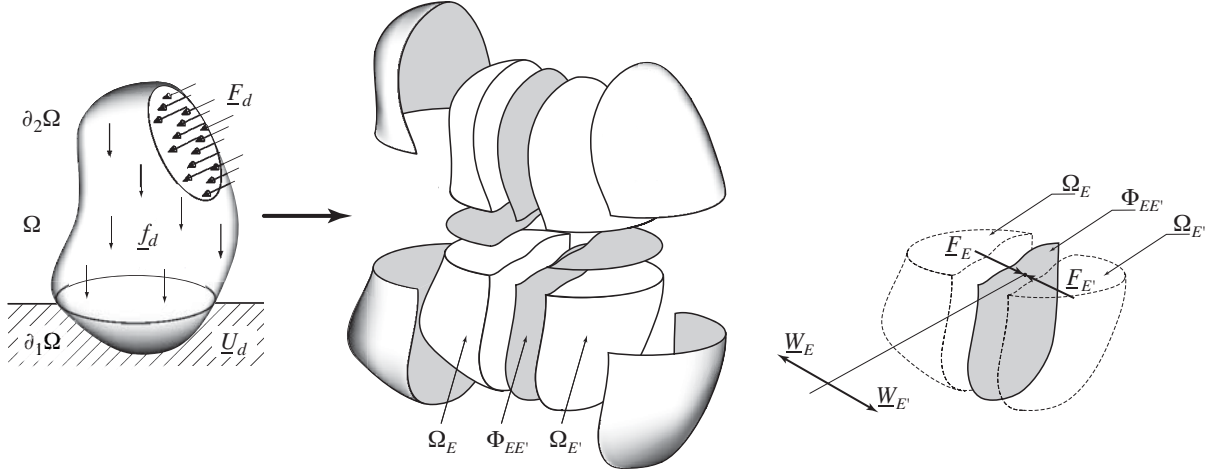


FIGURE 3 – Décomposition de la structure en sous-structures et interfaces

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 », et dépend d'un certain nombre de paramètres μ , parmi lesquels le coefficient de frottement au niveau des contacts.

Pour prendre en compte les aspects multiéchelles en espace (pour les aspects temporels, on pourra se référer à [4]), on sépare les variables d'interfaces en une partie « macro » et un complément « micro ». Par exemple, pour la sous-structure Ω_E , les champs $(\underline{\dot{W}}_E, \underline{F}_E)$ sont écrits :

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

La partie macro $\underline{F}^M$ correspond à une moyenne de $\underline{F}$ et, en vertu du principe de Saint Venant, le complément microscopique $\underline{F}^m$ n'a qu'un effet localisé en espace. Un aspect important de la stratégie est d'imposer la transmission *a priori* de la partie $\underline{F}^M$ des efforts. Le problème est alors résolu en utilisant la méthode LATIN [5] : on cherche la solution

$$\mathbf{s} = (\dot{\epsilon}_{pE}, \underline{\dot{W}}_E, \sigma_E, \underline{F}_E)_{\Omega_E \subset \Omega}$$

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 Γ 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).

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

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 Γ dans l'espace généré par $(\dot{\epsilon}_{pE}, \underline{\dot{W}}_E)_{\Omega_E \subset \Omega}$ 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.

3.2 Proper Generalized Decomposition

Dans les travaux réalisés dans [1], la simulation d'une liaison pour un jeu de paramètres donné, et une valeur de chargement, représentait 48h de calcul sur un cluster, ce qui rendait difficile la générali-

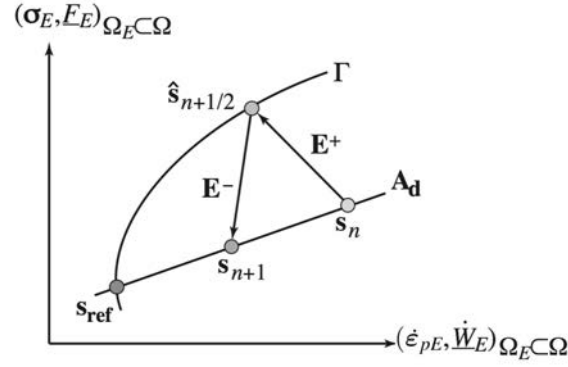


FIGURE 5 – Une itération de la méthode LATIN

sation de cette approche à l'ensemble des paramètres pour prévoir la réponse pour de grandes plages de variations. Pour accélérer la simulation dans le cadre de la méthode LATIN, on a introduit ici la méthode de réduction de modèles PGD, qui consiste en une représentation à variables séparées de la solution du problème [6].

4 Conclusion

Dans ces travaux, on montre qu'il est possible de construire des modèles réduits de liaisons pour la prédiction de l'amortissement dû au frottement dans les contacts. Ces « abaques virtuels » paramétrés devraient permettre aux ingénieurs d'accélérer le dimensionnement des futurs lanceurs en optimisant le choix de liaisons. Ils permettent aussi de prendre en compte la variabilité de ces paramètres, sur lesquels portent parfois d'importante méconnaissances, en facilitant la propagation des incertitudes sur les quantités d'intérêts en utilisant la théorie développée dans [2].

Références

- [1] A Caignot, P Ladevèze, D Néron, and J-F Durand. Virtual testing for the prediction of damping in joints. *Engineering Computations*, 27(5) :621–644, 2010.
- [2] P Ladevèze, G Puel, A Deraemaeker, and T Romeuf. Sur une théorie des méconnaissances en calcul des structures. *Revue Européenne des Eléments finis*, 13(5-7) :571–582, 2004.
- [3] J Lemaitre and J-L Chaboche. *Mechanics of solid materials*. Cambridge university press, 1990.
- [4] 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.
- [5] P. Ladevèze. *Nonlinear Computational Structural Mechanics—New Approaches and Non-Incremental Methods of Calculation*. Springer Verlag, 1999.
- [6] D Néron and P Ladevèze. Proper generalized decomposition for multiscale and multiphysics problems. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 17(4) :351–372, 2010.