

# Réponses vibratoires non linéaires d'un assemblage avec des liaisons frottantes

M. CLAEYS - J.-P. LAMBELIN - R. TODESCHINI / CEA – Cesta

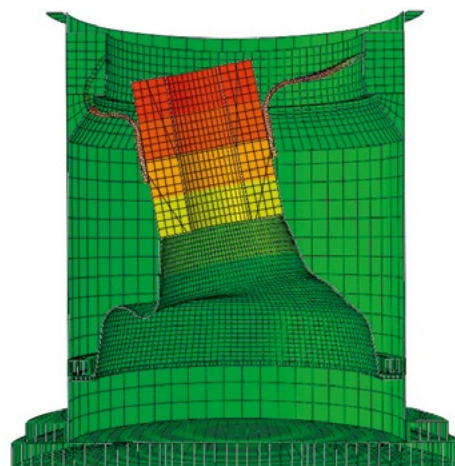
J.-J. SINOU / Laboratoire de tribologie et dynamique des systèmes, UMR 5513 CNRS – École centrale de Lyon

Le frottement joue un rôle essentiel dans les réponses vibratoires des assemblages. Il augmente la dissipation d'énergie et entraîne des glissements de fréquence de résonance lorsque la structure est soumise à de fortes excitations. Ce phénomène non linéaire ne peut être simulé que par l'utilisation d'une méthode de simulation vibratoire avancée. Ces travaux montrent comment simuler ce phénomène dans un contexte industriel et comparent les résultats de simulation avec des essais vibratoires. Au cours de cette étude, en plus des effets principaux du frottement, des phénomènes d'échanges d'énergie entre modes ont été identifiés expérimentalement. Ces derniers ont été retrouvés et expliqués au moyen de la simulation numérique.

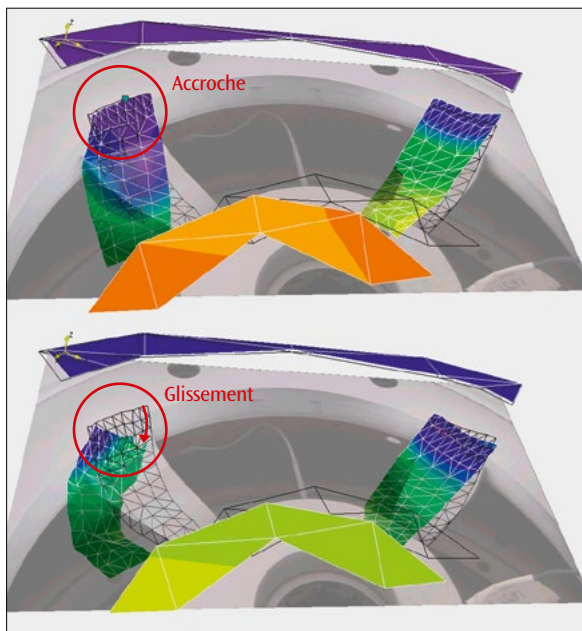
En dynamique des structures, on parle de réponse vibratoire non linéaire lorsque la réponse de la structure n'est pas proportionnelle au niveau d'excitation. Dans les assemblages, beaucoup de phénomènes non linéaires trouvent leur origine dans le frottement, c'est-à-dire dans l'apparition de glissement entre des composants qui sont en contact. Pour étudier ce phénomène vibratoire, des expériences et des simulations numériques ont été réalisées sur la maquette Harmonie du CEA – Cesta, présentée sur la **figure 1**. La maquette a été étudiée dans la direction axiale [1] puis transverse [2].

## Modélisation du frottement

Le colis central de la maquette Harmonie présente quatre lames qui sont en appui simple contre l'enveloppe externe. C'est au niveau de ces interfaces que le frottement peut apparaître. Un modèle éléments finis de la maquette a été réalisé. Le premier mode propre transverse du modèle, situé à 135 Hz, est représenté sur la **figure 1**. Pour observer directement le phénomène de frottement associé à ce mode, des mesures par vibrométrie laser à balayage ont été réalisées. Ces mesures permettent de visualiser la déformation de la structure au cours d'une oscillation vibratoire. Sur la **figure 2**, deux instantanés de ces mesures sont représentés. Les points du maillage correspondent aux points de mesure, le maillage est ensuite déformé et coloré selon la valeur du vecteur vitesse instantané mesuré. La lame de gauche, qui est accrochée à l'enveloppe sur la première image, glisse en rotation sur la seconde image. Au cours de chaque oscillation vibratoire, la



**Figure 1.** Photographie de l'enveloppe externe et du colis central de la maquette Harmonie (en haut) et représentation en coupe du modèle éléments finis, déformé selon le premier mode transverse à 135 Hz (en bas).



**Figure 2.** Mesures de champ de vitesse de déplacement obtenues par vibrométrie laser à balayage. Chaque point du maillage est un point de mesure; le maillage est déformé et coloré en fonction de la vitesse des points. La maquette est excitée dans la direction transverse, à 135 Hz et au niveau  $10 \text{ m/s}^2$ . Les deux images correspondent à deux instants séparés de 0,8 ms, entre lesquels le glissement en rotation de la lame de gauche apparaît.

liaison passe ainsi par des phases d'accroche et de glissement. Ce phénomène est modélisé par une loi de Coulomb.

### Simulation vibratoire non linéaire

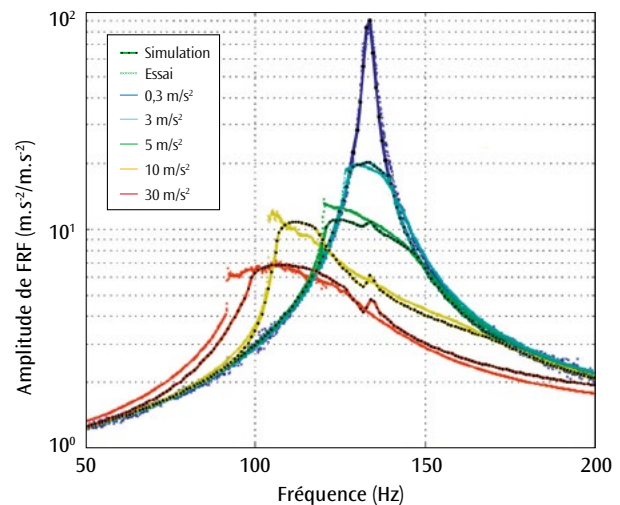
Pour prendre en compte cette loi de comportement non linéaire dans les simulations vibratoires, une méthode de simulation non linéaire, appelée méthode d'équilibrage harmonique (Harmonic Balance Method), déjà étudiée précédemment au CEA – Cesta [3], a été adaptée au contexte industriel de cette étude. Un algorithme de réduction de modèle a été utilisé pour ne conserver qu'une centaine de degrés de liberté dans le modèle avant de prendre en compte l'accroche au bout de chaque lame par un modèle de Coulomb. Les résultats des simulations sont tracés sous forme de fonctions de réponse en fréquence (FRF), qui traduisent le rapport entre les niveaux harmoniques de sortie et d'entrée. Avec un modèle linéaire, les FRF sont indépendantes du niveau d'excitation et seule la courbe bleue de la **figure 3** est obtenue. Elle correspond au comportement expérimental à faible niveau d'excitation. Lorsque le niveau d'excitation augmente, la simulation non linéaire permet de simuler les effets caractéristiques du frottement: la baisse de raideur, qui se traduit par une diminution de la fréquence de résonance; la dissipation d'énergie, qui se traduit par une diminution de la hauteur du pic de résonance.

En plus de ces effets principaux, des phénomènes d'interactions modales ont été observés et expliqués par la simulation numérique. En particulier, la

vibrométrie laser a révélé que sous l'effet du frottement, une excitation du premier mode transverse à 135 Hz entraînait une interaction avec un mode local de lame situé à  $13 \times 135 = 1755 \text{ Hz}$ , ce qui ne peut pas s'expliquer avec des phénomènes linéaires.

### Conclusion

Ces travaux ont montré une application concrète des outils de simulation vibratoire non linéaire dans le contexte industriel de la DAM. Les effets de dissipation énergétique et de changement de raideur dans la structure ont pu être simulés et comparés à l'expérience, ce qui ouvre la voie à une meilleure simulation de la réponse des structures assemblées à forts niveaux d'excitation. La dissipation d'énergie définit le niveau de résonance maximal qui est utilisé pour dimensionner les structures; ainsi, la prédiction de cette dissipation permet de maîtriser les marges de dimensionnement.



**Figure 3.** Amplitude de la fonction de réponse en fréquence (FRF) de la maquette Harmonie au sommet de son colis central, pour une excitation transverse de niveau croissant. Les résultats expérimentaux des essais sont représentés avec des croix; les résultats de simulation sont représentés en traits pleins avec des points noirs; les couleurs indiquent le niveau d'excitation. La très bonne corrélation essai-calcul démontre la pertinence de la démarche de simulation vibratoire non linéaire.

### Références

- [1] M. CLAEYS, J.-P. LAMBELIN, J.-J. SINOÛ, R. TODESCHINI, "Experiments and numerical simulations of nonlinear vibration responses of an assembly with friction joints – Application on a test structure named 'Harmony'", *Mechanical Systems and Signal Processing*, **70-71**, p. 1097-1116 (2016).
- [2] M. CLAEYS, J.-P. LAMBELIN, J.-J. SINOÛ, R. TODESCHINI, "Modal interactions due to friction in the nonlinear vibration response of the 'Harmony' test structure: Experiments and simulations", *Journal of Sound and Vibrations*, **376**, p. 131-148 (2016).
- [3] M. CLAEYS, J.-P. LAMBELIN, J.-J. SINOÛ, B. ALCOVERRO, "Multi-harmonic measurements and numerical simulations of nonlinear vibrations of a beam with non-ideal boundary conditions", *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simulat.*, **19**, p. 4196-4212 (2014).