

Test et validation de codes de simulation d'informatique graphique pour les structures élastiques minces et le contact frottant

V. Romero¹, M. Ly¹, A. H. Rasheed¹, R. Charrondière¹,
A. Lazarus², S. Neukirch², F. Bertails-Descoubes¹

¹ Univ. Grenoble Alpes, Inria, CNRS, Grenoble INP, LJK

² Sorbonne Université, CNRS, Institut Jean Le Rond d'Alembert, UMR 7190

Résumé — Nous présentons un jeu de quatre protocoles de test, inspirés de problèmes classiques en calcul de structures, dans le but de valider des codes de simulation d'informatique graphique pour les poutres et plaques élastiques, ainsi que le contact frottant. Ces codes d'informatique graphique ont été conçus initialement pour simuler des effets visuels complexes dans le cinéma, application pour laquelle la crédibilité au service de la narration prime sur le réalisme physique. Cela explique que de tels simulateurs ont été finalement peu confrontés au réel de façon quantitative, contrairement aux simulateurs développés en mécanique. Pourtant, ces simulateurs graphiques, grâce à leur robustesse et leur efficacité, sont de plus en plus détournés du secteur du film pour être utilisés dans la conception de systèmes réels, avec de vrais attendus en terme de prédiction. Ce nouvel usage appelle une validation quantitative rigoureuse et complète, non seulement pour pouvoir certifier la gamme de validité de tels simulateurs, mais également pour pouvoir les comparer à des outils numériques standard employés en mécanique. Les protocoles de test que nous proposons sont validés expérimentalement et sont conçus pour vérifier le traitement de la flexion, de l'interaction flexion-torsion, et du contact frottant solide.

Mots clés — Poutres, plaques, torsion, contact frottant, validation

Motivation Les modèles numériques développés par la communauté de l'informatique graphique couvrent certains phénomènes aussi explorés numériquement en mécanique (contact frottant, dynamique de structures minces par exemple), mais les deux communautés n'interagissent qu'assez peu, car animées historiquement par des motivations très différentes (narration et effets spectaculaires pour l'informatique graphique, construction de systèmes fiables en mécanique). Néanmoins, l'industrie du film dispose aujourd'hui, grâce à des interactions fortes avec la recherche académique, d'un arsenal de simulateurs potentiellement plus puissants que les outils standard de mécanique, notamment dans certains domaines comme le calcul du contact frottant entre objets déformables – et ce, "uniquement" dans le but de produire des effets spéciaux pour le cinéma.

De tels simulateurs étaient jusqu'à présent essentiellement utilisés afin de reproduire visuellement le comportement statique et dynamique d'objets élastiques, et ce avec des critères multiples et exigeants en terme de crédibilité visuelle et de controllabilité artistique, mais bien éloignés des critères stricts de validité physique requis en calcul des structures. Aujourd'hui, grâce à leur flexibilité, leur robustesse, et à la diffusion libre des codes sous-jacents, ces simulateurs graphiques sont de plus en plus prisés pour de nouvelles applications nécessitant des calculs prédictifs, comme le prototypage virtuel de structures ou la mesure non-invasive de paramètres, faisant ainsi concurrence aux outils classiques de mécanique.

Un besoin émerge donc, d'une part celui de quantifier le réalisme physique des codes d'informatique graphique, et d'autre part le comparer à celui des outils numériques classiques en mécanique. Notre but est alors de fournir des modèles théoriques et des bancs expérimentaux de mécanique ainsi qu'une série d'expériences de référence servant à valider un ensemble hétérogène d'outils numériques. Essentiellement, nous voulons tirer parti des meilleurs simulateurs de chaque communauté, pour concevoir in fine des prédictions fines, réalistes, et rapides sur le réel. Notre étude complète a été publiée dans le principal journal d'informatique graphique [1].

Les quatre tests Nous avons sélectionné une série cohérente de tests, de complexité progressive : (i) flexion d'une poutre console soumise à son poids propre, (ii) couplage flexion-torsion d'une poutre

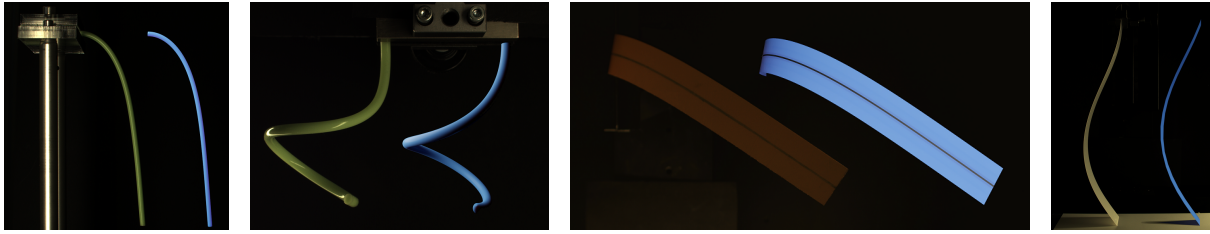


FIGURE 1 – Les quatres tests que nous avons utilisés à des fins de validation. De gauche à droite : poutre console (simulation ici via DISCRETE ELASTIC ROD), couplage flexion-torsion inspiré de [2] (simulation ici via SUPER-HELIX), flambement latéral (simulation via FENICSSHELL), et test de contact frottant inspiré de [3] (simulation ici via ARGUS).

avec courbure naturelle, (iii) flambement latéral d’une plaque tenue sur la tranche, (iv) instabilité d’une poutre en contact frottant avec une paroi, comme illustré sur la Figure 1. Ces tests sont des configurations classiques du calcul de structures en géométrie nonlinéaire et leurs courbes de chargement ou de bifurcation sont en général connues et publiées, voir par exemple [4, 2, 5, 3]. Néanmoins les études sous-jacentes pouvant être non-exhaustives, nous avons scrupuleusement reconstruit la partie expérimentale complète, et redérivé (parfois revisité) la théorie, en calculant précisément une courbe maîtresse caractérisant chaque expérience (loi d’échelle, ou bien frontière entre deux régimes distincts). En particulier, nous avons revisité les lois d’échelle connues pour le flambement latéral (iii), en en proposant une nouvelle, et nous avons considérablement enrichi les données expérimentales des protocoles (ii) et (iv).

Évaluation Nous avons ensuite soumis une sélection d’une dizaine de codes connus en informatique graphique à ces tests, ainsi que deux codes de référence en mécanique (ABAQUS et FENICSSHELL [6, 7, 8]), en suivant une méthodologie rigoureuse d’évaluation. Au final, nous classons les résultats en deux catégories : les codes qui permettent d’atteindre précisément la courbe maîtresse (codes certifiés), et les autres (codes non certifiés). Nos résultats montrent que certains simulateurs de graphique très utilisés pour les plaques et les coques échouent au test le plus simple, tandis que d’autres codes plus récents, ainsi que les codes connus pour les tiges et le contact frottant, passent ces tests avec succès et se comportent parfois même mieux que certains logiciels éléments finis commerciaux qui pourtant font référence en calcul de structures.

Références

- [1] V. Romero, M. Ly, A.-H. Rasheed, R. Charrondiere, A. Lazarus, S. Neukirch, and F. Bertails-Descoubes. Physical validation of simulators in computer graphics : A new framework dedicated to slender elastic structures and frictional contact. *ACM Transactions on Graphics*, 40(4) :art. 66, 2021.
- [2] J. Miller, A. Lazarus, B. Audoly, and P. Reis. Shapes of a Suspended Curly Hair. *Physical Review Letters*, 112(6), 2014.
- [3] T. Sano, T. Yamaguchi, and H. Wada. Slip Morphology of Elastic Strips on Frictional Rigid Substrates. *Physical Review Letters*, 118(17) :178001–5, 2017.
- [4] W.G. Bickley. The heavy elastica. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 17(113) :603–622, 1934.
- [5] A. G. M. Michell. Elastic stability of long beams under transverse forces. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 48(292) :298–309, 1899.
- [6] M. Habera, J. S. Hale, A. Logg, C. Richardson, J. Ring, M. E. Rognes, N. Sime, and G. N. Wells. The fenics project, 2018.
- [7] M. Brunetti, J. S. Hale, and C. Maurini. Fenics-shells demos, 2018.
- [8] J. S. Hale, M. Brunetti, S. Bordas, and C. Maurini. Simple and extensible plate and shell finite element models through automatic code generation tools. *Computers & Structures*, 209 :163–181, 2018.