UMR Acoustique Environnementale
(Université Gustave Eiffel-Cerema)

PROPOSITION DE STAGE 2027

Sujet de stage

Modélisation numérique de la propagation et de l'excitation d'ondes guidées circonférentielles dans les milieux viscoélastiques, en rotation et sous pression : application aux pneumatiques

Niveau recommandé

☒Master (M2) ☐Master (M1) ☐Ingénieur ☐Licence ☐Bac + 2

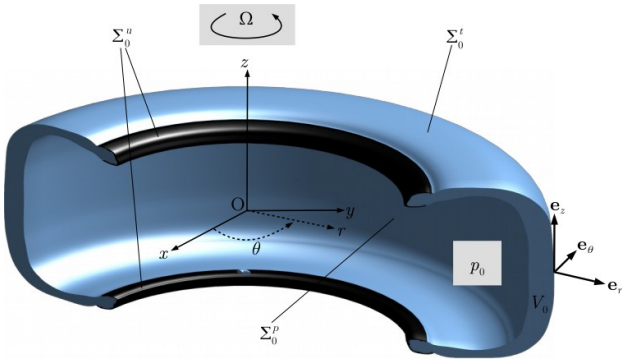
Compétences requises

Étudiant·e de M2 mécanique, acoustique ou mathématiques appliquées, avec de bonnes bases en dynamique des structures ou propagation d'ondes, ainsi qu'en modélisation numérique par éléments finis, à l'aise en calcul scientifique (Matlab ou Python), motivé·e par le couplage entre modélisation physique et développement numérique. Une familiarité avec l'analyse modale et les problèmes aux valeurs propres serait la bienvenue. Un intérêt pour les métiers de la recherche est indispensable (possibilité de poursuivre en thèse).

Description

La modélisation du bruit de contact pneumatique/chaussée est un enjeu important pour réduire l'impact du bruit du trafic routier sur l'environnement. L'interaction entre le pneumatique et la chaussée au cours du roulement génère des sources de bruit d'origine mécanique (excitation vibratoire du pneumatique) et aérodynamique (pompage d'air) qui sont ensuite amplifiées par le dièdre formé entre le pneumatique et la chaussée [1].

D'un point de vue purement mécanique, le pneumatique est une structure élastique circulaire complexe, en rotation permanente, maintenue sous pression interne, et constituée pour l'essentiel d'élastomères dont le comportement mécanique dépend fortement de la fréquence. Ces trois ingrédients – courbure/rotation, précontrainte, dispersion viscoélastique – influencent conjointement la propagation des ondes guidées circonférentielles (se propageant autour de la structure). Or l'essentiel des modèles numériques disponibles traite ces ingrédients séparément ou de façon partielle.



Nous avons récemment proposé une formulation vibratoire de ce problème [2], toutefois limitée à un amortissement visqueux modal simplifié, inadapté au comportement réaliste du caoutchouc. En adoptant le point de vue des ondes guidées plutôt que celui des vibrations pour résoudre le problème, le stage vise à combler ce manque en couplant la formulation initiale à une loi de comportement viscoélastique dépendant arbitrairement de la fréquence.

Étape 1 : Propagation et excitation en régime purement élastique

Il s'agira d'étendre le modèle vibratoire de pneumatique existant [2] (éléments finis, axisymétrique, implémentation Matlab) à une propagation guidée circonférentielle de type SAFE (Semi-Analytical Finite Element) – méthode jusqu'alors plutôt appliquée

dans un contexte de contrôle non destructif ultrasonore, pour modéliser des guides droits sans mouvement de rotation (voir par exemple [3]). Le calcul se fera à fréquence ω fixée, pour en extraire les nombres d'onde circonférentiels complexes k(ω), choix qui aura l'avantage d'éviter tout schéma itératif lors de l'introduction ultérieure de la viscoélasticité (le module complexe étant alors évalué directement à ω donné). La rotation introduit cependant une matrice gyroscopique (effet Coriolis), qui brise la symétrie du problème aux valeurs propres. Pour la réponse forcée, cela impose de construire une relation de biorthogonalité généralisée impliquant modes à gauche et modes à droite (voir par exemple [4], dans le cas des guides sans rotation). Cette relation permettra de projeter l'excitation – en pratique, localisée au niveau du contact pneumatique/chaussée – sur les modes guidés et d'en déduire la réponse forcée par superposition modale.

Étape 2 : Introduction d'une loi viscoélastique dispersive

Le comportement viscoélastique du caoutchouc sera décrit par des modules complexes $C^*(\omega)=C'(\omega)+iC''(\omega)$ dépendant de la fréquence, ce qui nécessitera a priori un réassemblage des matrices SAFE à chaque fréquence. Le problème étant indépendant d'une fréquence à l'autre, une stratégie de parallélisation pourra être mise en œuvre pour accélérer les calculs. Une brève étude bibliographique permettra de choisir la loi la plus pertinente pour un élastomère de pneumatique [5,6], permettant de couvrir une large bande de fréquence, du quasi-statique jusqu'à quelques kHz (modèle de Zener simple ou fractionnaire, série de Prony/Maxwell généralisé…).

Perspectives

Ce travail pourra naturellement se prolonger en thèse par la prise en compte du contact pneumatique/chaussée et/ou la modélisation du rayonnement acoustique vers l'extérieur par couplage BEM (Boundary Element Method).

Références

[1] Heckl M., Tyre noise generation. *Wear* 113 (1986), 157-170.

[2] Treyssède F., Cesbron J., Waveguide finite element modelling for broadband vibration analysis of rotating and prestressed circular structures: Application to tyres, *Journal of Sound and Vibration* 543 (2023), 117361.

[3] Treyssède F., A model reduction method for fast finite element analysis of continuously symmetric waveguides, *Journal of Sound and Vibration* 508 (2021), 116204.

[4] Treyssède F., Laguerre L., Numerical and analytical calculation of modal excitability for elastic wave generation in lossy waveguides, *The Journal of the Acoustical Society of America* 133 (2013), 3827-3837.

[5] R.M. Christensen, Theory of viscoelasticity - An introduction, 2d edition, Academic Press, New York, USA, 1982.

[6] G. Dubois, J. Cesbron, H.P. Yin, F. Anfosso-Lédée, Macro-scale approach for rough frictionless multi-indentation on a viscoelastic half-space, Wear 272 (2011) 69–78. https://doi.org/10.1016/j.wear.2011.07.011.

Lieu du stage

☐ **Uni Eiffel, Campus Lyon** (25, avenue François Mitterrand, Case24, Cité des mobilités, F-69675 Bron Cedex)
☒ **Uni Eiffel, Campus Nantes** (route de Bouaye, CS4, F-44344 Bouguenais Cedex)
☐ **Cerema – Strasbourg** (11, rue Jean Mentelin, Strasbourg-Koenigshoffen, F-67035 Strasbourg)

Durée du stage

Date de début : 03/03/2027
Date de fin : 29/08/2027
Durée : 6 mois

Contacts

Fabien TREYSSÈDE / Julien CESBRON
Tél. 02 40 84 59 32 / 02 40 84 56 62
Email : fabien.treyssede@univ-eiffel.fr
julien.cesbron@univ-eiffel.fr
www.umrae.fr

Gratification

Indemnité équivalente à 15% du plafond horaire de la Sécurité Sociale, pour un organisme public français.
https://www.service-public.fr/simulateur/calcul/gratification-stagiaire