

**Master thesis and internship[BR]- Master's thesis : Computational method for whirl-flutter analysis of urban air mobility vehicles[BR]- Internship**

**Auteur :** Jacquet, Charles

**Promoteur(s) :** Salles, Loïc

**Faculté :** Faculté des Sciences appliquées

**Diplôme :** Master en ingénieur civil en aérospatiale, à finalité spécialisée en "aerospace engineering"

**Année académique :** 2023-2024

**URI/URL :** <http://hdl.handle.net/2268.2/20851>

---

*Avertissement à l'attention des usagers :*

*Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.*

*Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.*

---

# Computational method for whirl-flutter analysis of urban air mobility vehicles

Charles Jacquet

Supervisor - L. Salles

Master of Science in Aerospace Engineering - University of Liège

Academic year 2023-2024

## Abstract

This thesis examines the whirl-flutter phenomenon in urban air mobility vehicles, crucial for the safety and efficiency of next-generation aircraft. The rise of Electric Vertical Take-Off and Landing (E-VTOL) vehicles, driven by the demand for fast urban transport, emphasizes the need to understand and mitigate aeroelastic instabilities like whirl-flutter, particularly in designs with distributed electric propulsion systems. Historically, whirl-flutter has caused catastrophic failures, highlighting the need for comprehensive analysis in modern aircraft designs.

The objective of this work is to develop a comprehensive computational model using the Finite Element Method to fully capture the dynamics between rotating, expressed in a floating frame of reference, and stationary parts of a structure, enabling a more accurate study of the whirl-flutter phenomenon. This analysis is conducted using the Floquet theory to study the stability of the system, particularly in a fixed-rotating frame of reference. The model includes an innovative time dependent mechanical coupling strategy for the mass, gyroscopic, and centrifugal stiffness structural matrices therefore fully preserving the dynamics of the structure, a first in the literature.

The research methodology involves the validation of various finite element matrices and components derived from Euler-Bernoulli 3D beam elements, followed by the implementation of time-dependent coupling between rotating and stationary components. This coupling is validated through case studies, including a ground resonance model and a rotating shaft with blades. Finally, the developed model is applied to a wing-propeller structure, illustrating its capability to work on complex geometry structures.

The results show that the partial coupling, specifically the coupling between translational degrees of freedom of rotating structures and those of stationary structure at the hub, is successfully validated. However, it is demonstrated that the Newmark integration scheme does not provide consistent results, highlighting the need for alternative approaches such as Runge-Kutta scheme for accurate time integration. Although the full coupling is not entirely validated, the initial results suggest that the implementation is correctly performed and shows promise for future validation efforts. This partial success demonstrates the potential of the developed model as a tool for accurately capturing critical dynamics in whirl-flutter analysis, contributing to the design and certification of future urban air mobility vehicles.

**Keywords :** Floquet Theory, whirl-flutter, validation model, rotating structure, rotating/stationary time coupling, finite element modeling, floating frame of reference, Newmark, Runge-Kutta.

# Méthode de calcul pour l'analyse du flottement gyroscopique des véhicules aériens urbains

Charles Jacquet

Superviseur - L. Salles

Master of Science in Aerospace Engineering - University of Liège

Année académique 2023-2024

## Résumé

Cette thèse explore le phénomène de flottement gyroscopique dans les véhicules de mobilité aérienne urbaine, essentiel pour la sécurité des aéronefs de nouvelle génération. Avec l'essor des véhicules à décollage et atterrissage verticaux électriques, il devient crucial de comprendre et de contrôler les instabilités aéroélastiques telles que le flottement gyroscopique, particulièrement dans les conceptions utilisant des systèmes de propulsion électrique distribuée.

L'objectif de ce travail est de développer un modèle computationnel complet utilisant la méthode des éléments finis pour capturer entièrement les dynamiques entre les parties rotatives, exprimées dans un repère flottant, et les parties stationnaires d'une structure, permettant ainsi une étude plus précise du phénomène de flottement gyroscopique. Cette analyse est réalisée en utilisant la théorie de Floquet pour étudier la stabilité du système, en particulier dans un repère fixe-rotatif. Le modèle inclut une stratégie novatrice de couplage mécanique dépendant du temps pour les matrices structurales de masse, gyroscopique et de raideur centrifuge, préservant ainsi pleinement les dynamiques de la structure, une première dans la littérature.

La méthodologie de recherche implique la validation de diverses matrices et composants d'éléments finis dérivés des éléments de poutre 3D d'Euler-Bernoulli, suivie par la mise en œuvre du couplage dépendant du temps entre les composants rotatifs et stationnaires. Ce couplage est validé à travers des études de cas, incluant un modèle de résonance de sol et un arbre rotatif avec des pales. Enfin, le modèle développé est appliqué à une structure aile-moteur à hélices, illustrant sa capacité à travailler sur des structures de géométrie complexe.

Les résultats montrent que le couplage partiel, en particulier le couplage entre les degrés de liberté de translation des structures rotatives et ceux des structures stationnaires au hub, est validé avec succès. Cependant, il est démontré que le schéma d'intégration de Newmark ne fournit pas de résultats cohérents, soulignant la nécessité d'approches alternatives telles que le schéma d'intégration de Runge-Kutta pour une intégration temporelle précise. Bien que le couplage complet ne soit pas entièrement validé, les résultats initiaux suggèrent que la mise en œuvre est correctement réalisée et montre un potentiel pour les futurs efforts de validation. Ce succès partiel démontre le potentiel du modèle développé en tant qu'outil pour capturer avec précision les dynamiques critiques dans l'analyse du flottement gyroscopique, contribuant à la conception et à la certification des futurs véhicules de mobilité aérienne urbaine.

**Mots-clés :** Théorie de Floquet, flottement gyroscopique, modèle de validation, structure rotative, couplage temporel rotatif/stationnaire, modélisation par éléments finis, repère flottant, Newmark, Runge-Kutta.