

## **Master thesis and internship[BR]- Master's thesis : Modal analysis of a footbridge using the OMAX method[BR]- Integration internship**

**Auteur :** Purpura, Laura

**Promoteur(s) :** Denoel, Vincent

**Faculté :** Faculté des Sciences appliquées

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

**Année académique :** 2022-2023

**URI/URL :** <http://hdl.handle.net/2268.2/16755>

---

### *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.*

---

# Résumé

**Nom et prénom:** PURPURA Laura

**Titre du travail de fin d'études:** Analyse modale d'une passerelle piétonne en utilisant la méthode OMAX

**Section:** Ingénieur en aérospatiale

**Année académique:** 2022-2023

**Promoteurs:** Vincent Denoël (ULiège) & Hüseyin Güner (V2i)

L'identification des propriétés modales d'une passerelle piétonne caractérisant son comportement vibratoire peut être réalisée grâce à des méthodes d'identification modale. L'analyse modale opérationnelle avec des forces extérieures (OMAX), prenant en compte les forces ambiantes et artificielles, présente de nombreux avantages par rapport à d'autres méthodes d'identification classiques. En effet, elle permet de couvrir une plus large bande de fréquences et d'analyser les données même quand du bruit est présent dans le système. Le but de cette thèse est donc d'étudier l'effet d'un niveau de bruit croissant sur l'identification des propriétés modales. Cela a pu être réalisé en appliquant l'algorithme d'identification de sous-espaces combinée (CSI) développée dans le livre *Subspace identification for linear systems: theory - implementation - applications* par P. Van Overschee.

Afin de tester cet algorithme, un modèle simplifié de la passerelle piétonne suspendue de Tilff a été développé sur Matlab. Des forces artificielles ainsi que des forces ambiantes ont été appliquées sur ce modèle et sa réponse a été calculée grâce à la méthode de Newmark. Deux types de bruits ont été testés: un bruit aléatoire en bande limitée et un bruit induit par des piétons marchant sur la passerelle. Comme la méthode OMAX fait l'hypothèse que le bruit est un bruit blanc Gaussien, le second cas a permis de tester l'algorithme quand le bruit était coloré (des composantes en fréquence sont dominantes). En effet, la force induite par les piétons peut être décrite comme la somme de signaux sinusoïdaux. Lorsque le bruit était hors de la bande de fréquence d'intérêt (autour d'une des fréquences de résonance de la passerelle), les propriétés modales étaient proches de la valeur identifiée avec 0% de bruit. Cependant, lorsque le bruit était dans la bande de fréquence d'intérêt, une modification du coefficient d'amortissement a pu être observée. Pour un bruit blanc, le coefficient d'amortissement décroissait au fur et à mesure que le niveau de bruit croissait. Pour le bruit induit par les piétons, le même comportement a pu être observé excepté le fait que plus le nombre de piétons augmentait, plus l'influence du piéton additionnel était moindre (montrant donc un effet de saturation). Concernant la fréquence, appliquer un bruit dans la bande de fréquence d'intérêt a causé des variations dans la fréquence identifiée contrairement au cas où le bruit était blanc. En effet, quand l'hypothèse que le bruit doit être blanc n'est pas respectée, l'algorithme considère le bruit comme un pôle de la matrice d'état  $A$  et il apparaît donc comme un pôle réel dans les diagrammes de stabilisation.

Finalement, une campagne de mesures détaillée sur le site de la passerelle de Tilff a été réalisée avec l'aide d'un shaker et de piétons marchant d'un côté à l'autre de la passerelle. L'algorithme CSI a permis d'obtenir des résultats cohérents avec une autre méthode d'identification expérimentale classique lorsqu'il n'y avait pas de bruit (piétons) dans le système. Des résultats cohérents avec la partie numérique ont été également trouvés quand les piétons ont été ajoutés. Cependant, à la place d'évoluer vers des valeurs plus faibles, le coefficient d'amortissement évoluait vers des valeurs plus élevées. De plus, dans un système réel, le bruit n'est pas uniquement causé par les piétons mais aussi le vent, l'eau ou le trafic sous la passerelle.

# Summary

**Name and firstname:** PURPURA Laura

**Title of the Master's thesis:** Modal analysis of a footbridge using the OMAX method

**Section:** Aerospace engineering

**Academic year:** 2022-2023

**Promoters:** Vincent Denoël (ULiège) & Hüseyin Güner (V2i)

The identification of the modal properties of a footbridge characterising its vibration behaviour can be realised thanks to modal identification methods. The Operational Modal Analysis with eXogenous forces (OMAX) method, taking both ambient and artificial excitations into account shows several advantages over classical identification methods. Indeed, it allows to cover a wider frequency range and to analyse the data even when noise is present in the system. The goal of this thesis was to study the effect of an increasing level of noise on the identification of the modal properties. This could be realised by applying the Combined Subspace Identification (CSI) algorithm developed in the book *Subspace identification for linear systems: theory - implementation - applications* by P. Van Overschee.

In order to test this algorithm, a simplified numerical model of Tilff cable-stayed footbridge was developed in Matlab. Both artificial and ambient forces were applied to that model and its response was computed with a Newmark integration method. Two types of noise were tested: a limited band random noise and the noise induced by some pedestrians walking on the footbridge. As the OMAX method makes the assumption that the noise should be a Gaussian white sequence, the second case allowed to test the algorithm when the noise was coloured (dominant frequency components). Indeed, the force induced by the pedestrians can be described by a sum of sine signals. When noise was outside the frequency range of interest (around one of the eigenfrequency of the footbridge), the modal properties were close to the identified value at 0% noise. However, when noise was inside the frequency range of interest, a modification of the damping ratio could be observed. For the random white noise, the damping ratio decreased as the level of noise increased. For the noise induced by the pedestrians, the same behaviour was observed excepted the fact that as more pedestrians were added, the influence of the added pedestrian decreased (showing a saturation behaviour). Concerning the frequency, applying a noise in the frequency range of interest would cause variations in the identified frequency contrary to the case when noise was white. Indeed, when the white noise assumption is violated, the algorithm considers noise as poles of the state matrix  $A$  and they thus appear as real poles on the stabilisation diagrams.

Finally, a detailed measurement campaign on the site of the Tilff footbridge was realised with the use of a shaker and pedestrians walking back and forth on the footbridge. The CSI algorithm provided consistent results with another classical experimental modal analysis when there was no noise (pedestrians) on the system. When the pedestrians were added, consistent results with the numerical part were found. However, instead of converging towards lower values, the damping converged towards higher values. Moreover, in a real system, the noise is not only caused by the pedestrians but also by the wind, the water or the traffic underneath the footbridge.