**PhD Thesis: Barbara ZAPAROLI CUNHA**

**Title**: Enhancing Structural Dynamics and Vibroacoustics Design through Digital Twins Enabled by Machine Learning and Transfer Learning

Vibroacoustic design is critical in the early stages of product development to detect and resolve potential issues before the product is put into production, ultimately reducing development time and costs and improving the final product performance. A promising tool that has emerged for vibroacoustic design is the Digital Twin (DT). DTs create high-fidelity virtual replicas of products at a low computational cost, enabling a thorough design search that leads to optimal and robust designs. However, the nonlinear and non-smooth nature of vibroacoustic problems, the lack of interpretability and physics foundation of data-based models, and the data scarcity at the early stages of design pose challenges for building accurate and affordable DTs.

In this context, this thesis proposes a novel data-based framework for modeling DTs of vibroacoustic systems that can speed up system evaluations and improve product design. The proposed framework relies on Machine Learning (ML) techniques to infer system models based on data obtained from high-fidelity simulations. The framework combines various learning methodologies to improve the accuracy, interpretability, and physical consistency of ML algorithms for usage in the vibroacoustic domain. Additionally, since acquiring a substantial amount of data in the early stages of vibroacoustic design is usually prohibitively expensive, this thesis aims to improve the data efficiency of these algorithms to make their implementation feasible.

The thesis evaluates different classes of ML methods in vibroacoustic problems with varying degrees of nonlinearity, non-smoothness, uncertainty, and dimensionality to identify suitable methods. Moreover, a feature engineering approach incorporates expert knowledge into the ML model by creating new inputs based on existing physical models to address ML's accuracy and consistency with the target physical system. The thesis also employs Global Sensitivity Analysis to enhance the model's interpretability and physical consistency. The sensitivity analysis provides a comprehensive understanding of how changes in the input variables affect the model's output, facilitating the identification of the most influential variables.

To overcome the scarcity of data at the beginning of vibroacoustic design, a novel solution is introduced: the use of Transfer Learning (TL) to leverage knowledge from past product generations. The effectiveness of TL in problems with low-dimensional tabular data under conditional shift was thoroughly examined to assess the approach's viability in constructing DTs. This analysis identifies TL methodologies suitable for constructing vibroacoustic DTs and demonstrates that the proposed approach significantly enhances data efficiency.

Furthermore, the thesis demonstrates the proposed framework's use in an industrial application, specifically the early robust optimization of the NVH performance of gear transmissions. This demonstration showcases how the framework contributes to modeling DTs of vibroacoustic systems. The developed DT accelerates system evaluations and aids in product design. Thus, this thesis provides valuable tools to overcome the challenges of constructing DTs for vibroacoustic product design.

**Keywords:** Digital Twin, Vibroacoustic, Surrogate Models, Transfer Learning, Product Design, Machine Learning, Digital Prototype, Data Efficiency.

**Thèse de doctorat : Barbara ZAPAROLI CUNHA**

**Titre**: Amélioration de la Conception de la Dynamique Structurelle et de la Vibroacoustique grâce à des Jumeaux Numériques Utilisant l'Apprentissage Automatique et l'Apprentissage par Transfert

La conception vibroacoustique est cruciale dès les premières étapes du développement d'un produit pour détecter et résoudre les problèmes potentiels avant que le produit ne soit mis en production, réduisant ainsi le temps et les coûts de développement et améliorant les performances du produit final. Un outil prometteur qui a émergé pour la conception vibroacoustique est le Jumeau Numérique (i.e. Digital Twin, DT). Les DT créent des répliques virtuelles haute-fidélité de produits à un faible coût de calcul, permettant une recherche de conception approfondie menant à des conceptions optimales et robustes. Cependant, la nature non linéaire et discontinue des problèmes vibroacoustiques, le manque d'interprétabilité et de fondement physique des modèles basés sur des données, ainsi que la parcimonie des données aux premières étapes de la conception posent des défis pour la construction de DT précises et abordables.

Dans ce contexte, cette thèse propose un nouveau formalisme basé sur les données pour la modélisation de DT de systèmes vibroacoustiques, capable d'accélérer les évaluations de systèmes et d'améliorer la conception de produits. Le formalisme proposé repose sur des techniques d'apprentissage automatique (i.e. Machine Learning, ML) pour inférer des modèles de systèmes basés sur des données obtenues à partir de simulations haute-fidélité. Le formalisme combine diverses méthodologies d'apprentissage pour améliorer la précision, l'interprétabilité et la cohérence physique des algorithmes de ML utilisés dans le domaine vibroacoustique. De plus, l'acquisition d'une quantité substantielle de données lors des premières phases de la conception vibroacoustique étant coûteuse, cette thèse vise à améliorer l'efficacité des données pour ces algorithmes et rendre leur mise en œuvre faisable.

La thèse évalue différentes classes de méthodes de ML appliqué à des problèmes vibroacoustiques présentant différents degrés de non-linéarité, de non-régularité, d'incertitude et de dimensionnalité pour identifier les méthodes appropriées. De plus, une technique est utilisée pour intégrer les connaissances d'experts dans le modèle d'apprentissage automatique en introduisant de nouvelles entrées basées sur des modèles physiques existants pour améliorer la précision et la cohérence des prédictions par ML avec le système physique cible. La thèse se base également sur une analyse de sensibilité globale pour améliorer l'interprétabilité et la cohérence physique du modèle. L'analyse de sensibilité offre une compréhension complète de la manière dont des modifications au niveau des variables d'entrée impactent les résultats en sortie du modèle, facilitant ainsi l'identification des variables les plus influentes.

Pour surmonter le problème de parcimonie des données au début de la conception, une nouvelle solution est introduite : l'utilisation de l'apprentissage par transfert (i.e. Transfer Learning, TL) pour exploiter les connaissances des générations de produits passées. L'efficacité du TL dans les problèmes avec des données tabulaires de basse dimension sous décalage conditionnel a été examinée en détail pour évaluer la viabilité de l'approche dans la construction de DT. Cette analyse identifie les méthodologies de TL adaptées à la construction de DT vibroacoustiques et démontre que l'approche proposée améliore significativement l'efficacité des données.

De plus, la thèse démontre l'utilisation du formalisme proposée sur une application industrielle, en particulier l'optimisation robuste aux premiers stages de conception des performances en terme de bruit et des vibrations des transmissions par engrenages. Cette démonstration montre comment le formalisme contribue à la modélisation de DT de systèmes vibroacoustiques. Le DT développé accélère les évaluations de systèmes et facilite la conception de produits. Ainsi, cette thèse fournit des outils précieux pour relever les défis de la construction de DT pour la conception de produits vibroacoustiques.

**Mots-clés:** Jumeau Numérique, Vibroacoustique, Modèles de Substitution, Apprentissage par Transfert, Conception de Produits, Apprentissage Automatique, Prototype Numérique, Efficacité des Données.