

## Résumé de la thèse – Anglais

Machining plays a vital role in the economy due to its ability to produce high-value, high-precision components used across all industries. This subtractive process uses cutting tools to shape raw material. However, during machining, the cutting tool gradually wears down. This wear alters the interaction between the tool and the workpiece, which can lead to deviations in the final product. As a result, the manufactured part may fail to meet dimensional tolerance requirements, surface roughness standards, or residual stress specifications. Although new technologies are emerging to improve cutting tool performance, tool wear remains inevitable. Because the mechanisms of tool degradation are highly variable, tool lifespan can differ significantly, even under similar cutting conditions. Therefore, timely replacement of worn tools remains a major challenge, as it directly impacts production costs, machine productivity and environmental emissions. Minimizing both production and environmental costs while avoiding unnecessary tool replacements has made real-time monitoring of tool condition during machining a critical challenge. Consequently, the aim of this thesis is to develop methods for monitoring and forecasting the tool's state throughout the machining process. This approach is part of the broader emergence of Industry 4.0, driven by the vast amount of data generated by machine tools and the growing potential for process automation.

This thesis focuses on the turning and milling processes.

It proposes the use of artificial intelligence-based models, which are particularly well-suited to the challenges of tool condition monitoring. Several approaches are developed:

- Indirect approaches, which rely on signals measured during machining, such as cutting forces, vibrations, acoustic emissions, and machine power consumption. These signals are used to infer the tool's condition and determine whether it can still produce parts within the required tolerances. This method can be applied during machining without disrupting the cutting process. This approach enables the evaluation of the tool's current condition and the prediction of its future state.
- Direct approaches, which involve capturing an image of the tool and directly measuring wear from the photo. While this method provides a direct assessment of the wear zone, it requires stopping the machining process to perform the measurement. This approach only enables the evaluation of the tool's current condition.

Both approaches are thoroughly developed in the context of milling and turning, allowing for a comparison of their performance, advantages, and limitations. All methods demonstrated sufficient accuracy in monitoring or predicting tool wear under the scenarios considered, with estimation errors of only a few percent. In addition to developing these models, the thesis addresses several gaps identified in the literature, most notably, the integration of confidence intervals and explainability into the proposed methods, as well as the application of various approaches to comparable datasets.

Thanks to the range of methods and strategies developed in this work, practitioners can gain a clear understanding of the expected performance of each technique, enabling more informed decision-making regarding tool replacement. These findings therefore provide valuable insights

for industrial practitioners seeking to implement intelligent tool monitoring systems, contributing to the broader goals of Industry 4.0.

## Résumé de la thèse – Français

L'usinage joue un rôle essentiel dans l'économie grâce à sa capacité à produire des composants de haute valeur et de haute précision utilisés dans tous les secteurs industriels. Ce procédé soustractif utilise des outils de coupe pour façonnner la matière brute. Cependant, au cours de l'usinage, l'outil de coupe s'use progressivement. Cette usure modifie l'interaction entre l'outil et la pièce, ce qui peut entraîner des écarts sur le produit final. En conséquence, la pièce fabriquée peut ne pas respecter les tolérances dimensionnelles, les attentes de rugosité de surface ou les spécifications de contraintes résiduelles. Bien que de nouvelles technologies émergent pour améliorer les performances des outils de coupe, l'usure reste inévitable. Comme les mécanismes de dégradation des outils sont très variables, la durée de vie des outils peut différer considérablement, même dans des conditions de coupe similaires. Par conséquent, le remplacement optimal des outils usés demeure un défi majeur, car il impacte directement les coûts de production, la productivité des machines et les émissions environnementales. Réduire à la fois les coûts de production et les impacts environnementaux, tout en évitant les remplacements d'outils inutiles, a fait de la surveillance en temps réel de l'état de l'outil pendant l'usinage un enjeu crucial. Ainsi, l'objectif de cette thèse est de développer des méthodes permettant de surveiller et de prédire l'état de l'outil tout au long du processus d'usinage. Cette approche s'inscrit dans la dynamique plus large de l'Industrie 4.0, portée par la quantité massive de données générées par les machines-outils et le potentiel croissant d'automatisation des procédés.

Cette thèse se concentre sur les procédés de tournage et de fraisage. Elle propose l'utilisation de modèles basés sur l'intelligence artificielle, particulièrement adaptés aux défis de la surveillance de l'état des outils. Plusieurs approches sont développées :

- Les approches indirectes, qui s'appuient sur des signaux mesurés pendant l'usinage, tels que les forces de coupe, les vibrations, les émissions acoustiques et la consommation électrique de la machine. Ces signaux permettent d'inférer l'état de l'outil et de déterminer s'il peut encore produire des pièces conformes aux tolérances requises. Cette méthode peut être appliquée pendant l'usinage sans perturber le processus de coupe. Elle permet d'évaluer l'état actuel de l'outil et de prédire son état futur.
- Les approches directes, qui consistent à capturer une image de l'outil et à mesurer directement l'usure à partir de la photo. Bien que cette méthode fournit une évaluation directe de la zone d'usure, elle nécessite l'arrêt du processus d'usinage pour effectuer la mesure. Cette approche ne permet donc que l'évaluation de l'état actuel de l'outil.

Les deux approches sont développées dans le contexte du fraisage et du tournage, permettant de comparer leurs performances, avantages et limites. Toutes les méthodes ont démontré une précision suffisante pour surveiller ou prédire l'usure des outils dans les scénarios considérés, avec des erreurs d'estimation de seulement quelques pourcents. En plus du développement de ces modèles, la thèse aborde plusieurs lacunes identifiées dans la littérature, notamment l'intégration d'intervalles de confiance et d'explicabilité dans les méthodes proposées, ainsi que l'application de diverses approches à des ensembles de données comparables.

Grâce à la diversité des méthodes et des stratégies développées dans ce travail, les praticiens peuvent obtenir une compréhension claire des performances attendues pour chaque technique, ce qui leur permet de prendre des décisions plus éclairées concernant le remplacement des outils. Ces résultats offrent ainsi des perspectives précieuses pour les industriels souhaitant mettre en œuvre des systèmes intelligents de surveillance des outils, contribuant aux objectifs plus larges de l'Industrie 4.0.