

Vitesse Angulaire et Cyclo(non)stationnarité Comme Innovations en Surveillance de l'usinage

I. Contexte général

Malgré l'ancienneté du procédé d'usinage, la quête de productivité se heurte à l'usage grandissant de nouveaux matériaux (superalliages, composites) dont la mise en œuvre est moins maîtrisée. Dans le même temps, les structures sont allégées au maximum, les géométries se font plus fidèles aux sollicitations en usage, créant des souplesses problématiques pour leur fabricabilité. Les fabricants se heurtent donc à la créativité des concepteurs de matériaux et de pièces, et doivent maîtriser sans cesse le renouveau des conditions de coupe par une adaptation accrue des trajectoires d'usinage et une surveillance du procédé.

Ce double défi conduit à des processus de normalisation et de qualification du procédé pour garantir la santé des pièces fabriquées, en particulier dans le cas du transport [1] : si les pièces ne peuvent pas être intégralement contrôlées (par exemple : limite du CND, intégrité matière en fond de perçage), les signaux surveillés devront garantir la conformité de la fabrication par rapport à une pièce *test* intégralement validée (et potentiellement détruite). Les risques principaux sont l'apparition de bris d'outil, l'installation de vibrations dans le système usinant, l'endommagement de la broche. **L'objectif général de ce projet est de contribuer au renforcement des possibilités de surveillance d'un procédé de fraisage, tout en veillant à améliorer sa robustesse.**

II. Positionnement

Le paramètre important lié au couple outil-matière est l'effort de coupe, mais il est difficile à mesurer directement pour un suivi de production industrielle. De multiples autres grandeurs sont toutefois disponibles pour effectuer une surveillance du procédé : échauffement en pointe d'outil, vibrations de la pièce ou de la machine-outil, signaux d'émission acoustiques ... [2]. Les principales approches retenues pour le développement des solutions industrielles de surveillance concernent la mesure de puissances ou de courants électriques, directement liées aux efforts de coupe, ou un suivi du comportement vibratoire de la broche. Les mesures électriques sont généralement limitées en bande passante [3], et le suivi vibratoire implique l'implantation d'un ou plusieurs capteurs dans l'espace machine, ou leur intégration dans le corps de broche.

Quel que soit le signal retenu, la surveillance nécessite la définition d'indicateurs fiables par rapport aux défauts suspectés. Ces indicateurs, issus du domaine temporel ou fréquentiel, restent très majoritairement des propositions classiques du traitement du signal : moments statistiques, diagramme temps-fréquence, ondelettes, filtrages. [4]. Souvent, ces indicateurs ne donnent pas par eux même la présence d'un défaut, mais leur évolution est scrutée au fur et à mesure de la production pour détecter un changement par rapport à un modèle initial. Ces approches génériques sont très utiles en cas d'évènement importants, mais restent assez peu sensibles à des évolutions lentes.

D'autres techniques de mesures ont été développées pour estimer plus précisément les efforts de coupe, ce qui est notamment le cas de la mesure de flexion du nez de broche [5], qui pose toutefois la question de la dépendance à la longueur de l'outil utilisé, sans résoudre l'impact de l'ajout de capteurs dans l'enceinte d'usinage. Enfin, en dépit d'un pilotage moderne de la broche, il a été démontré que la fréquence de rotation de la broche fluctuait légèrement au gré du passage des dents de la fraise dans la matière, ce qui présente un intérêt certain dans l'observation du procédé [6]. L'utilisation du codeur angulaire de la broche a été également envisagée pour identifier si une dent de la fraise en particulier était défailante [5,7]. L'opérateur mathématique associé dans cette dernière étude est la moyenne synchrone angulaire, opérateur de base pour les techniques de cyclostationnarité, qui semblent capable de détecter des vibrations de type broutement [8,9].

Malheureusement, toutes ces techniques angulaires ont été développées dans le cadre d'usinage de laboratoire présentant essentiellement des trajectoires rectilignes à engagement constant. Cela permet de rester dans le cadre de la cyclostationnarité : le caractère périodique des signaux – lié au nombre de dents de l'outil – ne sera pas modifié par une trajectoire rectiligne à paramètres constants. La réalité est généralement différente, avec des trajectoires issues de logiciels et des géométries plus complexes, amenant des variations de direction (phase) et d'engagements (charge) de l'outil et des conditions non-stationnaires.

III. Travail envisagé

Ce projet s'attellera au développement de nouvelles techniques de traitement du signal, plus adaptées à la variabilité des trajectoires complexes. **Le défi principal est donc l'extension des approches cyclostationnaires actuelles à des cas cyclo-non-stationnaires, présentant des fluctuations de charge et de phase.**

Les indicateurs et les méthodes développées seront confrontés à des programmes d'usinage proche de cas industriel, en restant attentif aux capacités industrielles d'intégration : les analyses seront toutefois réalisées *hors-ligne*, avec un traitement du signal a posteriori. Les applications envisagées concernent en premier lieu la détection précoce de l'usure des outils et la stabilité de l'usinage. De manière générale, ces travaux contribueront au renforcement des connaissances dans le domaine de la surveillance des machines tournantes.

Ces approches novatrices seront développées principalement sur des mesures en effort, vibration, et vitesse angulaire. L'application à des signaux acoustiques ou d'émission acoustique est également envisagée. La multiplicité des indicateurs ainsi formés pourra être considérée dans des algorithmes de fusion de données, prenant en compte les données d'incertitude liées à chaque indicateur, dans le but de fiabiliser les alarmes de détection (théorie de Dempster-Schaffer).

IV. Bibliographie

- [1] Jean-F. Chabot. Intégrité de surface des pièces usinées et tenue en service des pièces critiques. Présentation au congrès *Intercut 2012*, St-Etienne.
- [2] P.W Prickett, C Johns, An overview of approaches to end milling tool monitoring, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 39, Issue 1, January 1999, Pages 105-122
- [3] Y.-H Jeong, D.-W. Cho. Estimating cutting force from rotating and stationary feed motor currents on a milling machine. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 42, n°14, 2002, p. 1559 - 1566.
- [4] R. Teti, K. Jemielniak, G. O'Donnell, D. Dornfeld, Advanced monitoring of machining operations, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Volume 59, Issue 2, 2010, Pages 717-739.
- [5] M. Ritou, S. Garnier, B. Furet, J.Y. Hascoet, Angular approach combined to mechanical model for tool breakage detection by eddy current sensors, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 44, Issues 1–2, 20 February 2014, Pages 211-220
- [6] F. Girardin, Didier Remond, Jean-F. Rigal. Tool wear detection in milling-an original approach with a non-dedicated sensor. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Elsevier, 2010, 24, pp.1907-1920
- [7] L. Pejryd, J. Repo, T. Beno, Machine Tool Internal Encoders as Sensors for the Detection of Tool Wear, *Procedia CIRP*, Volume 4, 2012, Pages 46-51, ISSN 2212-8271.
- [8] M. Lamraoui, M. Thomas, M. El Badaoui, Cyclostationarity approach for monitoring chatter and tool wear in high speed milling, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 44, Issues 1–2, 20 February 2014, Pages 177-198.
- [9] Mourad Lamraoui, Marc Thomas, Mohamed El Badaoui, F. Girardin. Indicators for monitoring chatter in milling based on instantaneous angular speeds. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Elsevier, 2014, 44 (1-2), p. 72-85.