

# Réduction des vibrations d'usinage : absorbeur passif non-linéaire et positionnement outil optimisé

## 1) Résumé

Ce projet de thèse vise à contribuer à la maîtrise des vibrations régénératives rencontrées dans le domaine de la fabrication mécanique. Pour cela, nous proposons de travailler sur deux volets complémentaires :

- Le premier vise à utiliser des absorbeurs innovants de type Nonlinear Energy Sink, afin de réduire les niveaux vibratoires. Ces absorbeurs ont montré leur efficacité sur les systèmes résonants, tout l'enjeu ici est de tester leur potentialité sur des systèmes instables, typique des vibrations régénératives rencontrées en fraisage.
- Le second volet vise à améliorer et remettre en question des stratégies d'usinage basées sur des positionnements d'outil développés sur un critère de minimisation de l'erreur géométrique uniquement en leur intégrant un critère plus global de minimisation de l'erreur d'usinage en limitant les phénomènes vibratoires grâce aux absorbeurs innovants précités.

## 2) Contexte et état de l'art

Les vibrations sont largement présentes dans le domaine de l'usinage et plus généralement en fabrication mécanique. On retrouve des vibrations forcées produites par une variation périodique des efforts de coupe et des vibrations régénératives (broutement). Ces dernières sont un frein à la productivité, car elles dégradent fortement l'état de surface, augmentent l'usure des outils coupants et réduisent la durée de vie des broches [ALT 04].

La modélisation des vibrations régénératives induit une équation différentielle à terme retard, dont l'analyse passe par l'étude de la stabilité. La représentation classique de la stabilité est effectuée dans le plan de la profondeur de passe axiale (raideur) en fonction de la vitesse de rotation (pulsation). Ce tracé, bien connu sous le nom de lobes de stabilité, permet de choisir des conditions de coupe stable, sans apparition de vibrations régénératives [ALT 95]. L'extension au fraisage a permis de disposer d'une approche semi-analytique [BUD 98]. Les approches ont été améliorées, pour avoir maintenant des modélisations abouties [MER 04] [ALT 08] [ALT 20]. Des travaux plus théoriques ont permis d'utiliser la théorie de Floquet par semi-discrétisation [INS 11] [MOL 17]. L'approche a aussi été étendue à l'usinage 5 axes avec la prise en compte de l'orientation de l'outil [SHT 18].

Comme évoqué précédemment, des positionnements d'outil dédiés à l'usinage en roulant des surfaces réglées non développables existent et sont principalement basés sur deux approches : une approche purement « géométrique » basée sur les caractéristiques géométriques de la surface à usiner et de l'outil avec un critère de minimisation de l'erreur géométrique [RUB 93] [LIU 95] [MEN 03] [MON 01][MON 02] [SEN 07], une approche cinématique basée sur le déplacement de l'outil intégrant la notion de surface enveloppe [CHI 04] [LAR 03] [GON 05]. Des études comparatives [SEN 07] [MON 12] ont pu mettre en évidence que le « positionnement amélioré », développé au sein du groupe SUMO [MON 01] [SEN 07], était le plus performant du point de vue de la minimisation de l'erreur géométrique.

Ces stratégies ont toutes été développées sans analyser le comportement vibratoire du système usinant. Le lien entre le choix de la stratégie d'usinage et son impact sur les vibrations auto-entretenues (phénomène de broutement) n'a pas été étudié, c'est ce que nous nous proposons de faire dans cette thèse.

De nombreuses techniques ont été développées pour réduire le broutement. Une première approche vise à réduire l'effet régénératif en utilisant des lobes de stabilité [ALT 20], à modifier le temps de retard (temps entre deux coups de dents) avec une variation continue de la vitesse de broche [SEG 11], ou encore avec des outils à pas et angle d'hélice variable [JIN 17].

Une autre approche vise à rajouter un dispositif amortissant pour réduire les vibrations. L'utilisation de porte-outil actif avec un actionneur piézoélectrique a été étudiée en tournage [MAT 14], on retrouve aussi des travaux en fraisage avec un porte-outil actif [BRE 10]. Les absorbeurs passifs linéaires de type Absorbeur à Masse Accordée ont aussi été largement étudiés pour les opérations d'usinage. Les travaux visent à développer une procédure de dimensionnement robuste pour le broutement en tournage [SIM 07] et en fraisage [WAN 17]. Globalement toutes ces approches sont peu utilisées industriellement et leur efficacité est souvent limitée par la faible plage fréquentielle. Il y a un vrai enjeu à développer des absorbeurs robustes dans un contexte industriel de fabrication.

Dans le même temps, dans le domaine de la dynamique des structures, le contrôle passif des vibrations constitue un domaine de recherche très actif. Au début du XXI<sup>e</sup> siècle, des travaux ont fait apparaître une nouvelle famille d'absorbeur : le Nonlinear Energy Sink (NES) [GEN 01] [VAK 01]. Dans leur configuration, les absorbeurs de type NES sont comparables aux AMA, mais dans ce cas, la masse ajoutée est connectée par une non-linéarité forte [KER 07]. Cette non-linéarité est un élément important du NES car elle permet le pompage énergétique, défini comme le transfert localisé et irréversible de l'énergie vibratoire de la structure principale, que l'on souhaite protéger, vers l'absorbeur non linéaire. Le couplage non linéaire permet aussi au NES d'entrer théoriquement en résonance avec n'importe quel mode linéaire de la structure primaire [GOU 07]. Les avantages du NES sont alors doubles : il est efficace sur une plage de fréquence plus large avec une masse ajoutée bien plus faible que pour l'AMA.

Le NES à non-linéarité cubique a fait l'objet d'études théoriques et expérimentales qui ont permis de bien comprendre le phénomène d'activation afin de définir des règles de dimensionnement [GOU 14], dans l'équipe MS2M. Cependant, en pratique la réalisation d'une raideur cubique pure est un travail subtil, car il est nécessaire d'utiliser un mécanisme de raideur négative pour compenser la partie statique, le réglage et l'encombrement sont alors des freins à son utilisation [QIU 18].

D'autres équipes ont travaillé sur des NES avec une raideur linéaire par morceaux [YUE 08], des NES rotatif avec le balourd d'une masse [SAE 19], des NES bistable [MAT 16] ou encore des NES à vibro impact [NUS 08]. De par sa conception relativement simple, le NES à vibro impact a largement été étudié dans l'équipe MS2M, afin de comprendre son fonctionnement et son dimensionnement sur des systèmes résonants [QIU 19].

Un premier travail exploratoire dans l'équipe MS2M a permis de montrer les potentialités de contrôle passif sur un système instable en tournage [GOU 15]. Un essai a permis de constater que la présence du NES à vibro-impact diminue l'amplitude des vibrations en tournage et des régimes semblables aux cycles de relaxations ont été observés. Des travaux théoriques ont permis de mieux comprendre les régimes observés et de définir un seuil d'activation de l'absorbeur en tournage [LI 17].

Une autre équipe a publié des travaux sur les NES en tournage, mais avec seulement une approche théorique [NAN 17].

Globalement, il y a peu de travaux sur le NES dans le contexte de la fabrication et aucun à notre connaissance en fraisage. De plus, le positionnement outil et la stratégie d'usinage sont peu pris en compte dans la stabilité de l'usinage.

L'objet de cette thèse en co encadrement entre l'équipe MS2M et l'équipe SUMO est de travailler sur la réduction des vibrations d'usinage, par l'utilisation d'absorbeur non linéaire de type NES en y associant les aspects positionnement outil, le tout avec une approche expérimentale forte.

### 3) Verrous scientifiques

La dynamique du tournage génère des efforts quasi constants, modélisés par une équation différentielle retardée à coefficient constant. Le passage au fraisage est un vrai défi, car les efforts sont fortement variables avec des coefficients périodiques. Un verrou scientifique vise l'analyse théorique d'un NES à vibro impact couplé à un système à retard et coefficients périodiques.

L'expérimentation en dynamique non linéaire est importante pour bien comprendre les phénomènes, mais elle nécessite un vrai savoir-faire. Un deuxième verrou scientifique est lié à l'expérimentation dans un contexte de fabrication mécanique sur un centre d'usinage. Les deux domaines ont leur spécificité et les combiner est un vrai challenge.

### 4) Objectifs

Les objectifs de cette thèse sont les suivants :

- Étendre l'utilisation du NES au procédé de fraisage. L'idée est de mieux cerner les seuils d'activation et leur effet sur la réduction du broutement.
- Développer un nouveau dispositif expérimental permettant d'étudier le fraisage d'une structure couplée à un NES à vibro-impact. L'accent sera mis sur l'instrumentation fine du dispositif pour mesurer le déplacement de la bille et de l'outil afin de mieux comprendre les régimes observés.
- Proposer une stratégie globale d'usinage avancée en usinage en roulant, permettant de prendre en compte l'influence du positionnement outil sur la stabilité de l'usinage.
- Quantifier l'effet de la réduction des vibrations régénératives sur la qualité de la surface usinée, en termes d'ondulation et de rugosité. En effet, une réduction des vibrations n'est pas synonyme d'amélioration de la surface usinée.

### 5) Références

[ALT 95] Y. Altintas, E. Budack – Analytical prediction of stability lobes in milling, Annals of the CIRP, Vol. 44, p. 357-362, 1995.

[ALT 04] Y. Altintas – Manufacturing automation, Cambridge University, Cambridge, 2004.

[ALT 08] Y. Altintas, G. Stepan, D. Merdol, Z. Dombovari – Chatter stability of milling in frequency and discrete time domain, Journal of Manufacturing Science and Technology, Vol 1, p. 35-44, 2008.

[ALT 20] Y. Altintas, G. Stepan, E. Budak, T. Schmitz, Z. M. Kilic – Chatter Stability of Machining Operations, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 142, p. 110801, 2020.

[BRE 10] C. Brecher, D. Manoharan, U. Ladra, H.-G. Köpken – Chatter suppression with an active workpiece holder, Production Engineering, Vol. 4, p. 239-245, 2010.

[BUD 98] E. Budak, Y. Altintas – Analytical prediction of chatter stability in milling part I General formulation, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 120, p. 22-30, 1998.

- [CHI 04] C. J. Chiou – Accurate tool position for five-axis ruled surface machining by swept envelope approach. *Computer Aided Design*, Vol. 36, p. 967-974, 2004.
- [GEN 01] O.V. Gendelman, L.I. Manevitch, A.F. Vakakis, R. M'Closkey – Energy pumping in nonlinear mechanical oscillators: part I—dynamics of the underlying hamiltonian systems, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 68, p. 34-41, 2001.
- [GOU 07] E. Gourdon, N.A. Alexander, C.A. Taylor, C.H. Lamarque, S. Pernot – Nonlinear energy pumping under transient forcing with strongly nonlinear coupling: Theoretical and experimental results, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 300, p. 522-551, 2007.
- [GOU 14] E. Gourc, G. Michon, S. Seguy, A. Berlioz – Experimental investigation and design optimization of targeted energy transfer under periodic forcing, *Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 136, p. 021021, 2014.
- [GOU 15] E. Gourc, S. Seguy, G. Michon, A. Berlioz, B.P. Mann – Quenching chatter instability in turning process with a vibro-impact nonlinear energy sink, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 355, p. 392-406, 2015.
- [GON 05] H. Gong, L. Cao, and L. Jian – Improved positioning of cylindrical cutter for flank milling ruled surface. *Computer-Aided Design*, Vol. 37, p. 1205-1213, 2005.
- [INS 11] T. Insperger, G. Stépán – *Semi-discretization for time-delay systems – Stability and Engineering applications*, Springer, 2011.
- [JIN 17] J. Niu, Y. Ding, L. Zhu, H. Ding – Mechanics and multi-regenerative stability of variable pitch and variable helix milling tools considering runout, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol 123, p. 129-145, 2017.
- [KER 07] G. Kerschen, D.M. McFarland, J.J. Kowtko, Y.S. Lee, L.A. Bergman, A.F. Vakakis – Experimental demonstration of transient resonance capture in a system of two coupled oscillators with essential stiffness nonlinearity, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 299, p. 822-838, 2007.
- [LAR 03] C. Lartigue, E. Duc, A. Affouard – Tool path deformation in 5-axis flank milling using envelope surface. *Computer Aided Design*, Vol. 35, p. 375-382, 2003.
- [LI 17] T. Li, D. Qiu, S. Seguy, A. Berlioz – Activation characteristic of a vibro-impact energy sink and its application to chatter control in turning, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 405, p. 1-18, 2017.
- [LIU 95] X.W. Liu – Five axis nc cylindrical milling of sculptured surfaces, *Computer-Aided Design*, Vol. 27, p. 887-894, 1995.
- [MAT 14] A. Matsubara, M. Maeda, I. Yamaji – Vibration suppression of boring bar by piezoelectric actuators and Ir circuit, *Manufacturing Technology*, Vol. 63, p. 373-376, 2014.
- [MAT 16] P.-O. Mattei, R. Ponçot, M. Pachebat, R. Côte – Nonlinear targeted energy transfer of two coupled cantilever beams coupled to a bistable light attachment, *Journal of Sound and Vibration*, Vol.373, p. 29-51, 2016.
- [MEN 03] C. Menzel, S. Bedi, S. Mann – Triple tangent flank milling of ruled surfaces, University of Waterloo, Ontario, Canada, 2003.
- [MER 04] S.D. Merdol, Y. Altintas – Multi frequency solution of chatter stability for low immersion milling, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 126, p. 459-466, 2004.
- [MOL 17] T.G. Molnar, Z. Dombovari, T. Insperger, G. Stépán – On the analysis of the double Hopf bifurcation in machining processes via centre manifold reduction, *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Vol. 473, p. 20170502, 2017.
- [MON 01] F. Monies – *Positionnement hors interférence pour l'usinage en bout et en roulant des surfaces gauches*. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 2001.
- [MON 02] F. Monies, J.N. Felices, W. Rubio, J.M. Redonnet, P. Lagarrigue – Five axis nc milling of ruled surfaces: optimal geometry of a conical tool. *The International Journal of Production and Research*, Vol. 40, p. 2901-2922, 2002.
- [MON 12] F. Monies, W. Rubio, J. Senatore – 5-axis Flank milling of sculptured surfaces, *Chapitre d'ouvrage, Machining of complex sculptured surfaces*, 2012.
- [NAN 17] A. Nankali, Y.S. Lee, T. Kalmár-Nagy – Targeted Energy Transfers for Suppressing Regenerative Machine Tool Vibrations, *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, Vol. 12, p. 011010, 2017.
- [NUC 08] F. Nucera, F.L. Iacono, D.M. McFarland, L.A. Bergman, A.F. Vakakis – Application of broadband nonlinear targeted energy transfers for seismic mitigation of a shear frame: experimental results, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 313, p. 57-76, 2008.
- [QIU 18] D. Qiu, S. Seguy, M. Paredes – Tuned nonlinear energy sink with conical spring: design theory and sensitivity analysis, *Journal of Mechanical Design*, Vol. 140, p. 011404, 2018.
- [QIU 19] D. Qiu, S. Seguy, M. Paredes – Design criteria for optimally tuned vibro-impact nonlinear energy sink, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 442, p. 497-513, 2019.
- [RUB 93] W. Rubio – *Génération de trajectoires du centre de l'outil pour l'usinage de surfaces complexes sur machines à trois et cinq axes*, Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse III, 1993.
- [SAE 19] A.S. Saeed, M.A. AL-Shudeifat, A.F. Vakakis – Rotary-oscillatory nonlinear energy sink of robust performance, *International Journal of Non-Linear Mechanics*, Vol. 117, p. 103249, 2019.

- [SEG 11] S. Seguy, T. Insperger, L. Arnaud, G. Dessein, G. Peigné – On the stability of high-speed milling with spindle speed variation, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 48, p. 883-895, 2010.
- [SEN 07] J. Senatore – Analyse qualitative des paramètres influents pour la planification des trajectoires sur surfaces gauches, Thèse de l'université Paul Sabatier, 2007.
- [SHT 18] O. Shtehin, S. Seguy, V. Wagner, Y. Landon, G. Dessein, M. Mousseigne – Low-frequency chatter genesis during inclined surface copy-milling with ball-end mill: experimental study, *Machining Science and Technology* Vol. 22, p. 621-637, 2018.
- [SIM 07] N. Sims – Vibration absorbers for chatter suppression: a new analytical tuning methodology, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 301, p. 592-607, 2007.
- [VAK 01] A.F. Vakakis, O.V. Gendelman – Energy pumping in nonlinear mechanical oscillators: part II—resonance capture, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 68, p. 2-48, 2001.
- [WAN 11] M. Wang – Feasibility study of nonlinear tuned mass damper for machining chatter suppression, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 330, p. 1917-1930, 2011.
- [YUE 08] Y. Yue, J. Xie – Symmetry and bifurcations of a two-degree-of-freedom vibroimpact system, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 314, p. 228-245, 2008