

PROJET DE THESE CIFRE EN MICRO-USINAGE (2015-2018)

Thème de thèse :

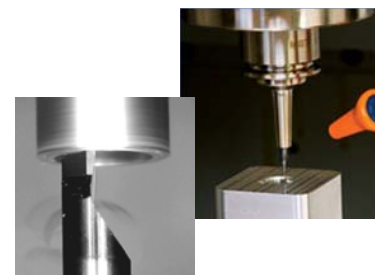
Optimisation des outils de μ -usinage et de leurs conditions d'utilisation par méthodes expérimentales et numériques : cas des μ -fraises destinées à l'usinage de céramiques techniques.

Laboratoire concerné :

Institut FEMTO-ST (UMR 6174), Département de Mécanique Appliquée

Thématique concernée :

Interactions Matériau-Procédé-Structure (IMPS)



Contexte :

L'un des objectifs fédérateurs de la thématique Interactions Matériau – Procédé – Structure du Département de Mécanique Appliquée est d'étudier les procédés d'usinage avancés. Le μ -usinage en particulier fait converger de nombreuses compétences locales ainsi que de nombreuses problématiques scientifiques et industrielles, et trouve naturellement sa place dans le pôle de compétitivité local sur les Microtechniques. De plus, les établissements partenaires et en particulier l'Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et des Microtechniques (ENSM), possèdent déjà du matériel expérimental. Les procédés de μ -usinage prennent actuellement leur essor et deviennent compétitifs dans le domaine de la production de petits et μ -composants mais de nombreux verrous scientifiques et technologiques sont encore présents dans la mise en œuvre de ces procédés. Des partenariats avec l'industrie permettent de développer et de rendre opérationnels de nouveaux outils et méthodologies d'optimisation des opérations de μ -usinage. Les développements réalisés au sein du thème IMPS concernent depuis 2006 l'optimisation des opérations de micro-usinage à l'outil coupant, et notamment la conception de nouveaux outils adaptés à l'usinage de matériaux durs et très durs. Ainsi, deux thèses précédentes sur le μ -fraisage des aciers durs ont permis à l'entreprise Magafor de mettre en production une gamme de micro-outils optimisée pour l'usinage des aciers durs (fraises droites et hémisphériques) qui le reclasse dans le peloton de tête au niveau mondial dans ce domaine. Il est souhaité à présent de développer des micro-fraises spécifiques pour les céramiques techniques très utilisées notamment dans le domaine biomédical. Ces matériaux très durs fragiles et friables nécessitent des développements particuliers s'appuyant sur une analyse fine des mécanismes de micro-coupe qui leur sont propres.

Ces travaux s'intègrent directement dans la plateforme de micro-fabrication mécanique MiFHySTO, pilotée par les enseignants-chercheurs du thème IMPS. Ils renforceront les connaissances et compétences de l'équipe concernant le domaine de l'outillage et les applications du micro-fraisage. Grâce à d'autres projets liés à l'usinage et à l'enchaînement de procédés (thèse sur la réalisation innovante de prothèses dentaires, contrats d'études partenariales, projet collaboratif μ -USIDIAM sur l'hybridation de procédés, etc.), l'équipe dispose à présent des moyens expérimentaux nécessaires à ce type d'étude (machine 3 axes et 5 axes de

précision, machine hybride de μ -électroérosion et μ -fraisage financée par la région Franche-Comté en 2012, systèmes de mesure de signaux haute fréquence, platines dynamométriques de haute sensibilité, topo-microscopes, microscope numérique, MEB, etc.).

Détails du projet :

Les résultats attendus au niveau de la recherche concernent dans un premier temps l'étude des mécanismes de micro-coupe propres aux matériaux céramiques via des essais de micro-coupe interrompue et de micro-coupe instrumentée (équipements développés dans le cadre de la thèse de R. Piquard, Fig. 1). Il s'agira dans cette étape en particulier d'identifier les modes de déformation-séparation de matière, les efforts générés en fonction des paramètres cinématiques et de prise de passe, ainsi que l'influence des effets d'échelle propres au micro-usinage. Des outils spécifiques de type tournage seront nécessaires, avec notamment la possibilité de modifier le matériau d'outil, son revêtement, l'acuité d'arête et les angles locaux. En parallèle, il faudra choisir et tester un panel d'outils de référence permettant d'observer les problèmes propres au procédé de micro-fraisage dans les matériaux céramiques et de positionner les produits préexistants. Ces deux premières étapes doivent permettre d'identifier des voies d'amélioration et de concevoir une nouvelle gamme d'outils adaptés à ces usinages exigeants. Des outils prototypes seront alors produits et testés afin de converger vers une solution viable techniquement et industriellement, et des calculs prédictifs sur le comportement des outils ou l'identification de modèles de coupe peuvent être mis en œuvre comme moyens complémentaires d'optimisation.

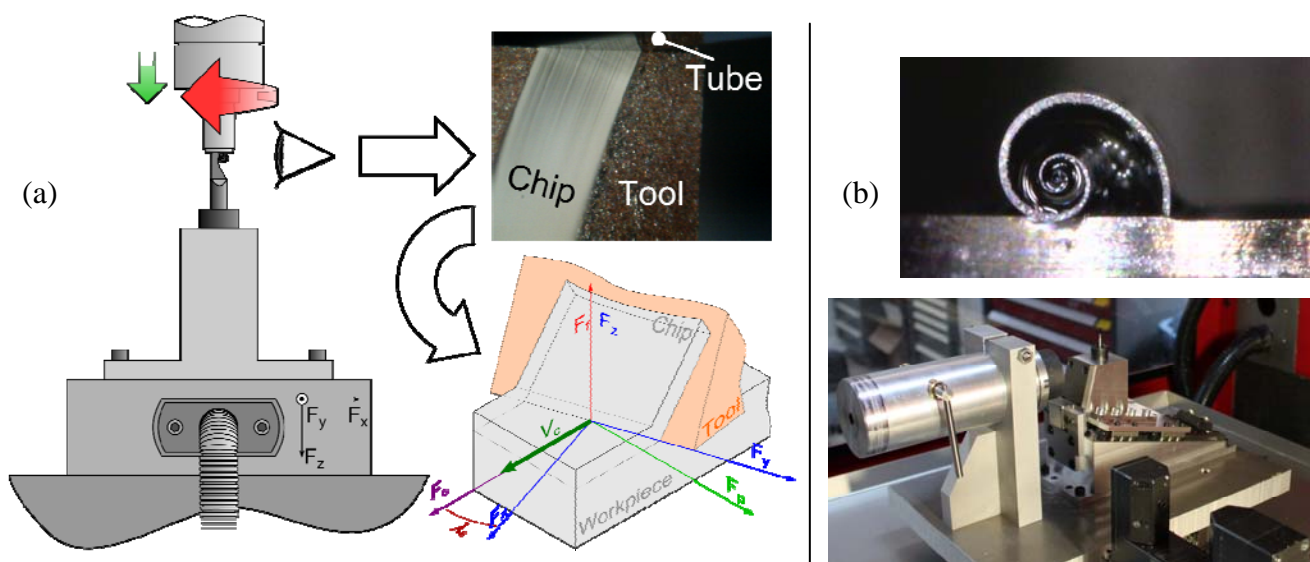


Fig. 1. Banc de mesure de micro-efforts en micro-coupe oblique (a) et banc de micro-coupe interrompue et copeau résultant (b) [thèse de R. Piquard, 2015]

Ce projet comporte **plusieurs volets** complémentaires qui ont fait leurs preuves lors de travaux précédents :

- **Pré-expérimentation** : Expérimentation à partir de l'existant qui consiste à tester différentes gammes de produits (ici d'outils) existantes sur le marché et de définir les critères et les performances attendues pour les étapes suivantes liées à l'optimisation.
- **Mesure in-situ** : Amélioration et mise en œuvre de pilotes expérimentaux (centres de μ -usinage instrumentés) : Mesure de micro-efforts de coupe, Mesure des vibrations d'outils in-situ, Méthodologies et outils d'analyse automatique des résultats obtenus.
- **Post-traitement** : Utilisation de moyens de métrologie mécanique et optique pour l'analyse de l'usure des outils, de la formation des copeaux et de l'intégrité de surface générée.
- **Modélisation** : Développement de modèles prédictifs permettant de calculer numériquement les grandeurs physiques associées à l'optimisation de la coupe (efforts, contraintes, températures, frottements, vibrations).
- **Identification** : Adaptation et mise en œuvre de méthodes permettant l'identification directe de paramètres décrivant le comportement des matériaux usinés à partir d'essais de coupe instrumentés, et utilisation de ces données pour améliorer la pertinence des modèles.
- **Optimisation** : Optimisation de la géométrie et de la nature des outils, des conditions de coupe, des conditions de lubrification et des trajectoires employées pour des opérations industrielles à partir des outils précités (ex. Fig. 2).
- **Industrialisation** : Développement des techniques de production en parallèle de l'évolution des modèles développés afin de garantir un niveau de qualité sur les produits (outils) compatibles avec les exigences de précision et de durée de vie et de mettre en évidence les limites du champ d'investigation lié à la phase d'optimisation.

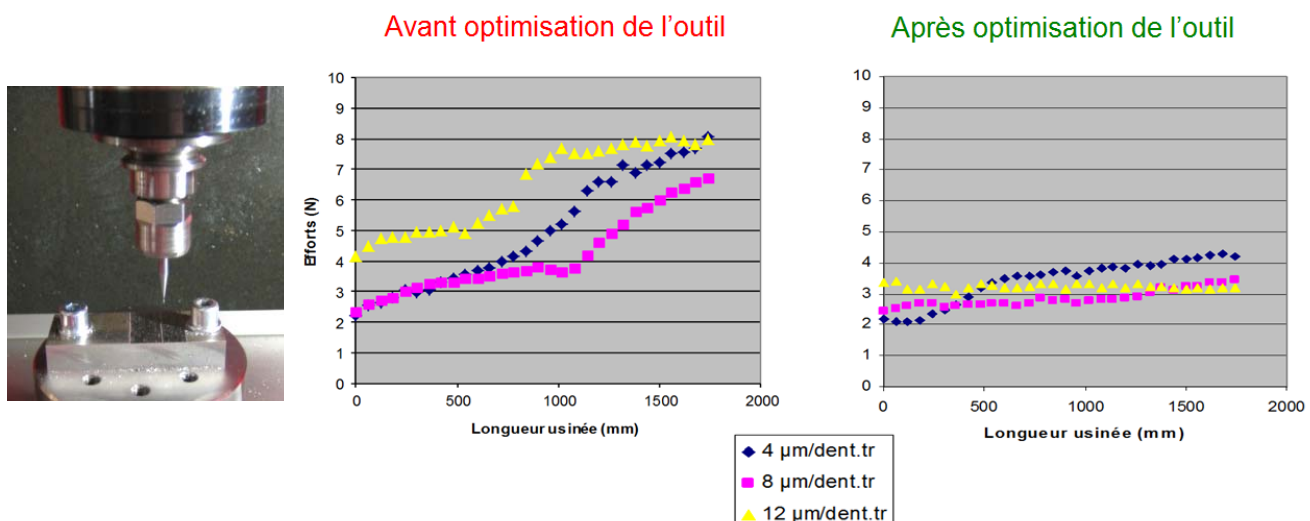


Fig. 2. Micro-fraisage d'un acier dur (54 HRC, μ -fraises \varnothing 0,5 mm) et évolution de l'amplitude d'effort résultant en rainurage [thèse d'A. Gilbin, 2012]

Les résultats attendus au niveau industriel concernent la définition d'une nouvelle gamme d'outils coupants de petits diamètres (μ -fraises droites, toriques et hémisphériques) spécialement dédiés aux opérations d'usinage de pièces de précision en céramique technique. Ces nouveaux outils doivent répondre aux attentes des secteurs consommateurs de ces micro-fraises (avant tout le dentaire mais aussi le luxe et de nombreux secteurs microtechniques) en termes de qualité de surfaces produites et de durée de vie des outils, mais aussi permettre une industrialisation et une commercialisation compatible avec les moyens de production du partenaire industriel et la réalité du marché des micro-outils dominé à l'heure actuelle par les fabricants japonais.

Encadrement scientifique :

Philippe PICART, Professeur à l'Université de Franche-Comté
Michaël FONTAINE, Maître de Conférences à l'ENSMM Besançon
Alexandre GILBIN, Maître de Conférences à l'ENSMM Besançon
Daniel MATTHEY, Président Directeur Général de l'entreprise MAGAFOR

Personnes directement associées :

- Gérard MICHEL, Ingénieur de Recherche à l'ENSMM Besançon, Responsable des moyens de μ -usinage de l'ENSMM, responsable du pôle Mise en Forme au DMA de FEMTO-ST
- Martial PERSONENI, Ingénieur d'études CNRS affecté à la plateforme MIFHySTO
- Christophe MATTHEY, Responsable B.E. chez MAGAFOR
- Post-doctorant à recruter en Septembre 2015 en lien avec le projet μ -Décolletage Dur (μ -usinage de composants micromécaniques dans des métaux durs, FEMTO-ST + 5 industriels)

Partenaires :

- Laboratoire LEM3 (UMR 7239), équipe SIP, Metz
- Laboratoire LaBoMaP (EA 3633), Arts et Métiers ParisTech, Cluny
- Laboratoire LTDS (UMR 5513), ENI de Saint-Etienne
- Laboratoire UTINAM (UMR 6213), équipe SRS, Besançon
- Laboratoire IRTES (EA 7274), Equipe LERMPS, Belfort-Montbéliard
- Centre technique des industries mécaniques (CETIM)
- Réseau Manufacturing'21 (18 laboratoires français spécialistes de fabrication mécanique)
- Associations 4M et I2M2 (promotion de la micro-fabrication et organisation de conférences spécialisées)

Expertise des participants dans le domaine considéré :

L'étude, l'optimisation et la surveillance des opérations d'usinage et de μ -usinage nécessitent des compétences particulières en modélisation d'une part et en mesure et instrumentation d'autre part. Les

travaux suivants reflètent l'expérience et l'implication très significatives de l'équipe dans ces domaines depuis 2006 :

Thèses :

4 thèses soutenues :

- Aurélien MAUREL-PANTEL, « Etude expérimentale et modélisation par éléments finis du procédé de fraisage : Applications à l'identification paramétrique des lois de comportement », Université de Franche-Comté, soutenue en Septembre 2009.
- Nasreddine ZEROUDI, « Prédiction des efforts de coupe en fraisage 3 axes à partir de trajectoires issues de FAO », EMP Alger, Co-encadrement avec FEMTO-ST, soutenue Juillet 2011.
- Alexandre GILBIN, « Optimisation des outils de μ -fraisage pour l'usinage des aciers durs : cas des fraises droites », UFC, financement BDI CNRS + Société Magafor, soutenue en Décembre 2012.
- Laurent GUYOUT, « Etude et optimisation du μ -fraisage des aciers inoxydables », cotutelle entre UFC et ENSAM de Cluny, Financement CETEHOR-CETIM, soutenue en Janvier 2014.

3 thèses en préparation de soutenance :

- Béranger ESCOLLE, « Optimisation des outils de μ -fraisage pour l'usinage des aciers durs : cas des fraises hémisphériques », UFC, financement CIFRE (entreprise Magafor), soutenance prévue pour fin 2015.
- Thibaud DESFORGES, « Stratégie d'enchaînement de procédés pour une réalisation innovante et maîtrisée de prothèses dentaires », financement CIFRE (Société Dental Manufacturing), soutenance prévue pour fin 2015.
- Romain PIQUARD, « Etude expérimentale et numérique de la micro-coupe des métaux », financement Ministère / ENS Cachan, soutenance prévue pour fin 2015.

Publications scientifiques de l'équipe dans le domaine :

En complément d'une quarantaine de communications dans des conférences nationales et internationales, les publications suivantes concernant l'usinage ont été faites dans des journaux internationaux à comité de lecture :

- A. Gilbin, M. Fontaine, G. Michel, S. Thibaud, P. Picart, « Experimental and Modeling Investigation on Micro-Milling of Hardened Steel: Influence of Feed Rate on Cutting Efficiency », *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, en soumission
- R. Piquard, S. Thibaud, A. D'Acunto, M. Fontaine, D. Dudzinski, « Phenomenological modelling of micro-cutting based on experimental results », *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, en soumission
- A. Maurel-Pantel, M. Fontaine, G. Michel, S. Thibaud, J.C. Gelin, « Experimental investigations from conventional to high speed milling on a 304-L stainless steel », *International Journal of Advanced*

Manufacturing Technology, Vol.69, Issue 9-12, pp.2191-2213, DOI 10.1007/s00170-013-5159-7, 2013

- A. Gilbin, M. Fontaine, G. Michel, S. Thibaud, P. Picart, « Capability of tungsten carbide micro-mills to machine hardened tool steel », *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol.14, n°1, 2013
- N. Zeroudi, M. Fontaine, « Prediction of tool deflection and tool path compensation in ball-end milling », *Journal of Intelligent Manufacturing*, DOI: 10.1007/s10845-013-0800-8, 2013
- N. Zeroudi, M. Fontaine, « Prediction of machined surface geometry based on analytical modelling of ball-end milling », *Procedia CIRP*, Vol. 1, p. 108-113, DOI 10.1016/j.procir.2012.04.017, 2012
- A. Maurel-Pantel, M. Fontaine, S. Thibaud, J.C. Gelin, « 3D FEM simulations of shoulder milling operations on a 304L stainless steel », *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 22, p. 13-27, 2011
- N. Zeroudi, M. Fontaine, K. Necib, « Prediction of cutting forces in 3-axes milling of sculptured surfaces directly from CAM tool path », *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 15, p.1-15, DOI : 10.1007/s10845-010-0460-x, 2010
- A. Maurel-Pantel, G. Michel, S. Thibaud, M. Fontaine, J.C. Gelin, « 3D FEM simulations of milling on a 304L stainless steel », *Steel Research International*, n° 79, Vol. 2, p. 599-602, 2008
- A. Maurel, G. Michel, S. Thibaud, M. Fontaine, J.C. Gelin, « Inverse Method for Identification of Material Parameters Directly from Milling Experiments », *International Journal of Material Forming*, Vol. 1, p. 1435-1438, 2008
- M. Fontaine, A. Devillez, D. Dudzinski, « Parametric geometry for modelling of milling operations », *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, Vol. 2, n°2, p. 186-205, 2007
- M. Fontaine, A. Moufki, A. Devillez, D. Dudzinski, « Modelling of cutting forces in ball-end milling with tool-surface inclination. Part I: Predictive force model and experimental validation », *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 189, p. 73-84, 2007
- M. Fontaine, A. Moufki, A. Devillez, D. Dudzinski, « Modelling of cutting forces in ball-end milling with tool-surface inclination. Part II: Influence of cutting conditions, run-out, ploughing and inclination angle », *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 189, p. 85-96, 2007
- M. Fontaine, A. Devillez, A. Moufki, D. Dudzinski, « Predictive force model for ball-end milling and experimental validation with a wavelike form machining test », *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 46, p. 367-380, 2006