

Institut FARMAN



Simulation, modélisation et tests virtuels de systèmes complexes

Laboratoires CMLA, LURPA, SATIE, LMT, LSV, pôle System@tic.

RÉPONSE À L'APPEL À PROJETS 2008

Nom du projet

IMPACT

Titre du projet

Influence des conditions d'usinage à grande vitesse des pièces de forme complexe sur leur tenue en fatigue

Influence of high speed Machining Parameters of Complex shape parts on Their high cycle fatigue life

Responsables Scientifiques

René BILLARDON – LMT-Cachan, Claire LARTIGUE – LURPA

Laboratoires

LMT-Cachan, LURPA

Mots-clés

Usinage à Grande Vitesse (UGV), optimisation de trajectoire, intégrité de surface, rugosité, contraintes résiduelles, fatigue à grand nombre de cycles

Equipe-projet

Prénom	Nom	Statut	Laboratoire (nom complet)	% du temps de recherche consacré au projet
Patrick	AIMEDIEU	IR	LMT-Cachan	10%
René	BILLARDON	PU	LMT-Cachan	20%
Nicolas	GUILLEMOT	Doctorant	LURPA/LMT-Cachan	100%
Olivier	HUBERT	MCF (HDR)	LMT-Cachan	10%
Claire	LARTIGUE	PU	LURPA	15%
Bernardin Kwamivi	MAWUSSI	MCF	LURPA	20%

Problématique scientifique

1. Contexte et problématique de l'étude

1.1. Objectifs et partenariat

Cette étude s'intègre dans un ensemble de travaux sur la simulation numérique des procédés de fabrication et en particulier du procédé d'Usinage à Grande Vitesse (UGV) des pièces de forme complexe. L'objectif général de ce projet est de développer les outils de modélisation permettant de mettre en place une première version d'un outil-métier de prévision de l'influence des paramètres du procédé sur la tenue en service de la pièce fabriquée et en particulier sur sa tenue en fatigue à grand nombre de cycles.

Cette étude intègre l'essentiel du projet de thèse de Nicolas GUILLEMOT [1] co-encadré par les deux porteurs de ce projet. Les premiers travaux déjà réalisés par Nicolas GUILLEMOT depuis le début de sa thèse en Septembre 2007 ont permis de prouver la faisabilité de ce projet.

Le partenariat universitaire mis en place pour la thèse de Nicolas GUILLEMOT implique les deux laboratoires de l'ENS de Cachan – LURPA et LMT-Cachan – porteurs de ce projet ainsi que le LMPI de l'ENSAM d'Angers et plus particulièrement l'équipe de Jean-Lou LEBRUN – spécialiste des problèmes d'usinage et de la mesure des contraintes résiduelles par diffraction des rayons X.

Par ailleurs, un partenariat industriel a été récemment finalisé avec le Département "Propriétés d'emploi et usinabilité" du Service Recherche et Développement d'un fournisseur de matériau – ASCOMETAL CREAS de LUCCHINI GROUP.

La complémentarité des compétences des membres de l'équipe-projet ainsi que la complémentarité de l'expertise et des moyens expérimentaux des partenaires universitaires et industriel réunis pour ce projet sont autant de gages de sa réussite – malgré son aspect ambitieux et prospectif (qui exclut à ce jour un soutien financier industriel).

1.2. L'Usinage à Grande Vitesse des pièces de forme complexe

L'usinage est un procédé de fabrication très ancien par enlèvement de matière à partir de bruts forgés, moulés,... Différents développements réalisés depuis une trentaine d'années – sur les outils coupants, les machines-outils, les matériaux usinés et les conditions de coupe – permettent aujourd'hui de mettre en œuvre industriellement ce procédé avec des vitesses (de coupe et d'avance) beaucoup plus élevées que celles utilisées en usinage classique – ce qui justifie l'appellation d'Usinage à Grande Vitesse (ou UGV).

Le procédé UGV est de plus en plus couramment utilisé pour réaliser en tournage des pièces de forme "simple". La coupe du matériau de la pièce en rotation est alors quasi continue à vitesses (de coupe et d'avance) quasi constantes.

La forme complexe d'une pièce peut être définie par des surfaces décrites par des modèles polynomiaux (B-spline, Nurbs, ...) ou par un ensemble de plusieurs carreaux de surfaces gauches et/ou simples raccordées entre elles.

Dans 80 à 90 % des cas, les outils coupants à plusieurs arêtes de coupe utilisés pour générer de telles surfaces sont des fraises en carbure monobloc, 2 tailles, toriques ou à bout sphérique, dont le diamètre est compris entre 1 et 20 mm.

La généralisation du procédé UGV au fraisage de pièces de forme complexe – contrairement au tournage, plus communément étudié – pose donc des problèmes spécifiques liés à l'aspect discontinu de la coupe du matériau et aux variations de vitesses (de coupe et d'avance) inévitables le long de trajectoires complexes.

Les grands domaines d'application possible de l'UGV des pièces de forme complexe incluent la fabrication des structures aéronautiques, des moteurs d'avion, des composants de l'industrie automobile et de la mécanique générale ainsi que la fabrication des outillages de mise en forme par déformation plastique (des métaux) et des moules d'injection (des polymères) ou de soufflage (des verres).

Les matériaux métalliques constituant ces structures sont des alliages d'aluminium, de titane, de nickel ou des aciers aux caractéristiques mécaniques de mieux en mieux contrôlées et de plus en plus élevées.

Dans un contexte UGV, la gamme d'usinage d'une pièce de forme complexe est classiquement composée d'une ébauche, d'une demi-finition, puis d'une finition. Lors de l'ébauche, l'objectif principal est d'obtenir un débit de copeaux maximum alors que la demi-finition a pour but d'obtenir une surépaisseur d'usinage la plus constante possible avant finition. Lors de l'opération de finition, les vitesses de coupe et d'avance sont beaucoup plus importantes qu'en usinage conventionnel – ce qui permet d'avoir une bien meilleure productivité, y compris sur des matériaux durs.

Pendant, la génération des trajectoires de finition ne peut être traitée comme un simple problème géométrique: seule une optimisation de la trajectoire de la fraise – par une méthode de programmation performante intégrant les aspects cinématiques, dynamiques et mécaniques (efforts de coupe) – permet de maîtriser les variations de vitesses tout au long de la trajectoire.

Dans le cadre de ce projet, il est proposé d'optimiser le choix de la stratégie d'usinage (mode de parcours de l'outil sur la surface) afin de mieux maîtriser les sollicitations thermomécaniques extrêmes au point de contact outil/pièce et par là, de mieux garantir la qualité de la surface générée, viz., la macro- et la micro-géométrie de la surface ainsi que l'état mécanique et microstructural du matériau au voisinage de cette surface.

1.3. Les aciers à haute limite d'élasticité

Les aciers à hautes caractéristiques mécaniques fabriqués à ce jour atteignent des limites d'élasticité de l'ordre de 1000 à 1200 MPa. Leur usinabilité, mais aussi leur tenue en fatigue, est gouvernée par différents types d'inclusions (à base de soufre, bismuth ou plomb, calcium,...).

L'une des problématiques de recherche des aciéristes est d'augmenter la limite d'élasticité des matériaux mais aussi leur usinabilité.

Le matériau retenu pour ce projet est un acier, METASCO MC 25MnSiCrVB6, qui pourra être fourni par ASCOMETAL sous trois nuances différentes, viz. avec la même composition et le même taux inclusionnaire mais avec une matrice de microstructure différente – ferrito-perlitique, bainitique ou martensitique.

Parmi d'autres résultats, cette étude devrait donc permettre de contribuer à mieux cerner le rôle relatif des inclusions et de la microstructure de la matrice d'un acier à haute limite d'élasticité – dit à usinabilité améliorée –, d'une part, sur son usinabilité en fraisage, et d'autre part, sur l'intégrité matière des surfaces ainsi usinées.

1.4. Tenue en fatigue et état initial non-standard du matériau induit par l'usinage

L'état initial de la surface, dit "non-standard", induit par les sollicitations thermomécaniques complexes et extrêmes au point de contact outil/pièce lors de l'usinage, peut être très différent de l'état "standard", i.e. la géométrie idéale de la pièce et l'état mécanique et microstructural de réception du matériau – généralement considéré par exemple pour dimensionner la pièce.

Cet état initial non-standard peut avoir une influence très importante sur les propriétés d'usage de la pièce ainsi usinée, par exemple sur ses propriétés tribologiques et/ou sa durée de vie.

Selon les fonctions de la pièce, l'intégrité matière de la "surface" d'une pièce usinée peut alors être définie par la micro-géométrie de la surface ou/et par l'état mécanique et microstructural du matériau en surface et en sous-surface – i.e. à une profondeur comprise entre 8 μm et environ 100 μm .

La propriété d'usage considérée dans le cadre de ce projet est la tenue en fatigue à grand nombre de cycles à température ambiante.

L'état micro-géométrique de la surface usinée sera caractérisé par sa rugosité et les micro-concentrations de contraintes correspondantes (cf. par exemple [2-3]).

L'état mécanique du matériau en sous-surface sera caractérisé par l'intensité et la profondeur des contraintes résiduelles.

L'état microstructural, dont d'éventuels changements de phase, sera caractérisé par différentes observations – microscopie, micro-dureté,... (cf. par exemple [4]).

2. Programme de travail

2.1. Méthodologie et durée du projet

L'ensemble de la démarche mise en place pour ce projet est schématisé par l'organigramme donné en annexe.

L'objectif est de mettre en place une première version d'un outil numérique de prévision de l'influence des paramètres du procédé de fraisage UGV sur la tenue en fatigue à grand nombre de cycles d'une pièce de forme complexe ainsi usinée. La maquette de cet outil-métier sera constituée de l'enchaînement de plusieurs modules, viz.

- i) un module de préparation d'usinage – dont la base est disponible au LURPA [5];
- ii) un module d'analyse des trajectoires – dérivé des travaux du LURPA [6-7];
- iii) un modèle de corrélation – développé dans le cadre de ce projet – entre les conditions de coupe et l'état initial non-standard induit;
- iv) un modèle d'endommagement permettant de prévoir la limite d'endurance en fatigue du matériau – déjà disponible au LMT-Cachan [8-9] et à développer dans le cadre de ce projet pour prendre en compte l'état initial non-standard induit par le fraisage UGV.

Le développement, l'identification et la validation des différents modèles ainsi enchaînés se feront grâce à l'analyse et à la réalisation d'essais réalisés sur des éprouvettes dites Volume Élémentaire Représentatif (VER), i.e. homogènes. Ces essais correspondent à

- i) des essais d'usinage par tournage ou fraisage instrumentés – réalisés au LPMI de l'ENSAM d'Angers ou au LURPA;
- ii) des analyses des états initiaux non-standard induits par ces usinages, viz. des mesures de rugosité, de micro-dureté, de contraintes résiduelles par diffraction des rayons X et des observations au microscope – réalisées au LPMI de l'ENSAM d'Angers, chez ASCOMETAL CREAS, au LURPA ou au LMT-Cachan;
- iii) des essais de fatigue réalisés chez ASCOMETAL CREAS ou au LMT-Cachan.

L'étude d'une pièce de forme complexe devrait constituer une première validation de l'ensemble de la démarche mise en place.

L'expertise complémentaire des partenaires réunis pour ce projet ainsi que l'implication directe de Nicolas GUILLEMOT, doctorant co-encadré par les deux porteurs de ce projet, permettent d'envisager avec confiance la mise en place d'un démonstrateur de cet outil-métier dans un délai de deux ans.

Les différents points de ce programme de travail sont rapidement repris dans les paragraphes ci-dessous.

2.2. Génération et analyse de trajectoires

Les conditions de coupe induites par le choix de la stratégie adoptée pour générer une forme complexe donnée peuvent être très différentes d'un point à l'autre de la surface générée, en particulier dans le contexte Usinage à Grande Vitesse. Les variations de conditions de coupe affectent la qualité géométrique de la surface et ont une influence sur l'état micro-géométrique 3D généré [2]. Dans le cadre de ce projet, il convient d'analyser la trajectoire de l'outil essentiellement en terme de vitesses instantanées de coupe et d'avance.

Faute d'un outil industriel de CFAO suffisamment ouvert, une part du travail réalisé dans le cadre de ce projet sera consacrée au développement et à la mise en place dans un même environnement informatique de différents modules en partie disponibles au LURPA, en particulier suite aux travaux de thèse de L. Tapie et de S. Lavernhe, et aux travaux de Master de N. Guillemot. Dans un premier temps, cette étude sera limitée aux trajectoires d'outils dites 3-axes.

Les entrées de ce premier outil numérique sont

- i) le modèle CAO de la pièce;
- ii) les paramètres associés au couple Machine-Outil / Commande Numérique;
- iii) la géométrie de la fraise;
- iv) la plage des paramètres de coupe utilisables pour le matériau choisi;
- v) la donnée d'une stratégie d'usinage (mode de balayage).

Les sorties de ce premier outil numérique sont les conditions de coupe en tout point de la pièce – après itération éventuelle sur le choix de la stratégie d'usinage afin de ne pas trop s'éloigner des conditions de coupe optimales.

La détermination de la plage des paramètres de coupe utilisables pour le matériau choisi pour cette étude – ou recherche du Couple Outil-Matière (COM) – se fera dans un premier temps grâce à des essais de tournage réalisés sur des lopins cylindriques de diamètre 80 mm.

2.3. Conditions de coupe et état initial non-standard

L'usinage par tournage d'éprouvettes cylindriques avec différentes conditions de coupe, faciles à contrôler avec ce procédé, permettront de générer des états initiaux non-standards "de référence" pour le matériau choisi pour cette étude.

L'analyse de ces états – géométriques, mécaniques et microstructuraux – avec les moyens brièvement décrits dans le paragraphe 2.1 serviront au développement d'un premier modèle permettant de corréler conditions de coupe et état initial non-standard. Il convient de noter que les variables pertinentes dans le cadre de ce projet pour caractériser cet état ne pourront être identifiées qu'après analyse des essais de fatigue discutés dans le paragraphe 2.4.

2.4. Etat initial non-standard et durée de vie en fatigue

Les essais de fatigue réalisés dans le cadre de cette étude seront essentiellement des essais dits d'auto-échauffement (cf. par exemple [8-9]). Sur beaucoup de matériaux, ces essais sont une alternative intéressante aux essais classiques de fatigue à grand nombre de cycles car ils permettent d'obtenir une estimation de la limite d'endurance du matériau à partir de la mesure – faite sur un nombre très limité d'éprouvettes – de l'échauffement lié à la microplasticité induite par la sollicitation de fatigue.

Quelques essais de fatigue à la rupture classiques seront cependant réalisés pour valider dans quelques cas particuliers les résultats obtenus avec les essais d'auto-échauffement.

La simplicité de ces essais permettra de caractériser rapidement l'influence de différentes conditions d'usinage sur la durée de vie d'éprouvettes de géométrie simple, donc usinées avec des conditions de coupe uniformes sur toute leur partie utile. L'analyse des résultats de ces essais permettra d'isoler les variables d'état pertinentes pour caractériser l'état initial non-standard induit par l'usinage en terme d'impact de cet état sur la durée de vie en fatigue à grand nombre de cycles. Ces variables pertinentes dépendent du matériau: dans le cas de l'acier choisi pour cette étude, elles ne seront pas limitées aux concentrations de contraintes liées à la micro-géométrie de la surface, comme cela peut être le cas pour un alliage d'aluminium [3].

Différentes analyses des essais d'auto-échauffement ont été proposées dans la littérature. Le modèle dit à deux échelles à fondement probabiliste développé au LMT-Cachan [8-10] pour interpréter les résultats de ces essais devrait permettre d'intégrer assez naturellement les variables pertinentes identifiées pour caractériser l'état initial non-standard induit par l'usinage.

2.5. Validation de l'approche

L'ensemble des travaux réalisés dans le cadre de cette étude sur des éprouvettes de fatigue usinées avec différentes conditions de coupe en tournage seront également effectués sur des

épreuves usinées avec différentes conditions de coupe en fraisage. La géométrie simple de ces éprouvettes plates permettra également de garantir des conditions de coupe uniformes sur toute la partie utile de l'éprouvette.

Les résultats obtenus en terme de caractérisation de l'état initial non-standard du matériau généré par le fraisage et en terme de durée de vie en fatigue pour différentes conditions de coupe constitueront une première base de données pour valider et/ou affiner, d'une part, le modèle de corrélation entre conditions de coupe et état initial non-standard et, d'autre part, le modèle de prévision de la durée de vie en fatigue.

La validation de la capacité prédictive de l'ensemble des outils développés dans le cadre de cette étude sera faite par comparaison des résultats expérimentaux et numériques obtenus sur une pièce test de forme complexe usinée avec différentes stratégies.

2.6. Bibliographie

- [1] N. GUILLEMOT, *Génération de trajectoires UGV pour les pièces de forme complexe. Elaboration de stratégies en finition*, Thèse de l'ENS de Cachan, *En préparation*, Soutenance prévue en Septembre 2010.
- [2] Y. QUINSAT, L. SABOURIN, C. LARTIGUE, *Surface topography in ball end milling process: description of 3D surface roughness parameter*, J. of Materials Processing Technology, Vol. 195, 135-143, 2008.
- [3] M. SURARATCHAI, C. MABRU, R. CHIERAGATTI, F. REZAI ARIA, *Influence de gammes d'usinage sur la tenue en fatigue d'un alliage léger aéronautique*, Congrès français de Mécanique 2005.
- [4] M. HABAK, *Étude de l'influence de la microstructure et des paramètres de coupe sur le comportement en tournage dur de l'acier à roulement 100Cr6*, Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, LPMI-Angers, 2006.
- [5] L. TAPIE, *Décompositions topologiques des outillages de forge pour la génération de trajectoires UGV*, Thèse de Doctorat de l'ENS de Cachan, LURPA, 2007.
- [6] N. GUILLEMOT, *Elaboration d'un protocole de conception de stratégies d'usinage de finition pour les pièces de formes complexes (outillage de forge) en UGV*, Mémoire de Master, LURPA, ENS de Cachan, Juin 2007.
- [7] S. LAVERNHE, *Prise en compte des contraintes associées au couple MO-CN en génération de trajectoires 5 axes UGV*, Thèse de Doctorat de l'ENS de Cachan, LURPA, 2006.
- [8] C. DOUDARD, *Identification rapide des propriétés en fatigue à grand nombre de cycles à l'aide d'essais d'échauffement*, Thèse de Doctorat de l'ENS de Cachan, LMT-Cachan, 2004.
- [9] M. PONCELET, *Multiaxialité, hétérogénéités intrinsèques et structurales des essais d'auto-échauffement et de fatigue à grand nombre de cycles*, Thèse de Doctorat de l'ENS de Cachan, LMT-Cachan, 2007.
- [10] C. DOUDARD, S. CALLOCH, P. CUGY, A. GALTIER, F. HILD, *A probabilistic two-scale model for high cycle fatigue life predictions*, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 28, N° 3, 279-288, 2005.

Originalité du Projet

Beaucoup d'études menées dans le domaine de l'usinage sont concentrées sur la modélisation de la coupe. Ces études sont fondamentales pour développer des outils de compréhension des nombreux mécanismes mis en jeu dans ce procédé. Cependant, l'extrême complexité de ce problème multiphysique ne permet pas d'envisager de pouvoir à court terme prévoir grâce à ces études l'état initial non-standard induit par les conditions de coupe.

L'approche proposée dans ce projet repose sur une approche globale "de la maîtrise des paramètres contrôlant le procédé de fabrication jusqu'aux propriétés d'usage de la pièce fabriquée" enchaînant une analyse cinématique des conditions de coupe le long d'une trajectoire complexe, un modèle de corrélation entre conditions de coupe et état initial non-standard purement phénoménologique, et un modèle d'endommagement de fatigue à grand nombre de cycles basé sur une approche micro-mécanique probabiliste.

Par ailleurs, le procédé de fraisage, qu'il est nécessaire de mettre en œuvre pour usiner des formes complexes, est – avec des conditions de coupe discontinues très variables le long de la trajectoire de l'outil – beaucoup plus délicat à appréhender et beaucoup moins étudié que le tournage.

Apport scientifique des différents partenaires du projet

Patrick AIMEDIEU, René BILLARDON, Olivier HUBERT, LMT-Cachan

Le développement et l'identification de modèles de comportement et d'endommagement des matériaux solides sous sollicitations thermo-mécaniques complexes tridimensionnelles constitue depuis la création du laboratoire l'un des domaines d'excellence du Secteur Mécanique et Matériaux du LMT-Cachan.

La prise en compte de l'état initial non-standard du matériau dans ces modèles est une préoccupation ancienne qui retrouve une grande actualité avec le développement plus récent de nombreuses études sur la modélisation des procédés de fabrication.

Par ailleurs, ce projet constituera l'une des premières applications du système de mesure des contraintes résiduelles par diffraction des rayons X dont le LMT-Cachan est en train de se doter. Contrairement aux équipements classiquement utilisés, ce système permettra, entre autres, d'étudier in situ l'évolution des contraintes résiduelles au cours d'un essai de fatigue. Patrick AIMEDIEU, IR, sera fortement impliqué dans la mise en place de ce nouvel équipement placé sous la responsabilité d'Olivier HUBERT.

Claire LARTIGUE, Bernardin Kwamivi MAWUSSI, LURPA

L'amélioration de la qualité des pièces de formes complexes au travers de la caractérisation des formes est l'un des principaux axes de recherche de l'équipe Geo3D du LURPA. Cette équipe est déjà engagée dans la modélisation par entités des pièces de forme complexe, la génération automatique de leurs processus d'usinage, la génération de trajectoires intégrant les spécificités de l'UGV des pièces de formes gauches, la prévision des états géométriques résultants, ainsi que l'étude des performances des machines outils UGV.

Nicolas GUILLEMOT, LURPA et LMT-Cachan

Ce projet intègre l'essentiel des travaux de thèse en cours de Nicolas GUILLEMOT, co-encadré par les deux porteurs de ce projet, après avoir effectué son stage de Master au LURPA.

Jean-Lou LEBRUN, LPMI de l'ENSAM d'Angers: partenaire universitaire externe

L'étude des procédés de fabrication, en particulier la mise en œuvre d'essais de coupe instrumentés et la caractérisation de l'état des surfaces générées par UGV, ainsi que la mesure des contraintes résiduelles par diffraction des rayons X constituent avec un des domaines d'expertise du LPMI d'Angers.

ASCOMETAL CREAS: partenaire industriel externe

La production d'aciers spéciaux constitue le cœur du métier d'ASCOMETAL. L'étude des propriétés d'emploi et de mise en œuvre de ces matériaux, en particulier l'usinabilité, constitue l'une des activités importantes du centre de recherche et développement CREAS. Outre cette expertise, ASCOMETAL CREAS peut également donner accès à différents moyens expérimentaux de caractérisation de la microstructure des matériaux et de mesure des contraintes résiduelles.

Demande d'aide financière

Participation à l'adaptation sur une machine de fatigue (coût total 60 000 €) d'un système de mesure in situ des contraintes résiduelles par diffraction	15 000 €
Destination des fonds au LMT-Cachan	15 000 €
Outils et outillages d'usinage	5 000 €
Participation à l'achat (coût total 30 000 €) d'une station de déplacement d'un capteur de mesure micro-géométrique	10 000 €
Destination des fonds au LURPA	15 000 €
Aide financière totale demandée :	30 000 €

Annexe: organigramme du projet

