

USINAGE

Technologies • Modélisations • Trajectoires

Christophe Teznière et coll.

USINAGE À GRANDE VITESSE

Technologies • Modélisations
Trajectoires

DUNOD

Liste des collaborateurs

Richard BEAREE	Maître de conférences, Arts et Métiers ParisTech, Lille
David BITTEROLF	Ingénieur Mécatronique, Siemens
Gilles CARABIN	Ingénieur de recherche, École Centrale de Nantes
Hélène CHANAL	Maître de conférences, IFMA
Jean-Philippe COSTES	Maître de conférences, Arts et Métiers ParisTech, Cluny
Emmanuel DUC	Professeur des universités, IFMA
Didier DUMUR	Professeur, Supélec
Guillaume FROMENTIN	Maître de conférences, Arts et Métiers ParisTech, Cluny
Vincent GAGNOL	Maître de conférences, IFMA
Jean-Yves HASCOET	Professeur des universités, École Centrale de Nantes
Yann LANDON	Maître de conférences, Université Toulouse III
François LAPUJOLADE	Maître de conférences, Arts et Métiers ParisTech, Paris
Claire LARTIGUE	Professeur des universités, Université Paris Sud 11
Arnaud LARUE	Maître de conférences, Arts et Métiers ParisTech, Paris
Sylvain LAVERNHE	Maître de conférences, ENS de Cachan
Georges MORARU	Maître de conférences, Arts et Métiers ParisTech, Aix-en-Provence
Flavien PACCOT	Professeur agrégé, IUT Clermont-Ferrand
Henri PARIS	Professeur des universités, Université Grenoble I
Vincent PATELOUP	Maître de conférences, IUT Limoges
Gérard POULACHON	Maître de conférences, Arts et Métiers ParisTech, Cluny
Mathieu RAUCH	Maître de conférences, École Centrale de Nantes
Mathieu RITOU	Maître de conférences, IUT de Nantes
Christophe TOURNIER	Maître de conférences, ENS de Cachan

INTRODUCTION

E. DUC & J.-Y. HASCOËT

Économiquement, techniquement, et socialement la fabrication vit une évolution et une remise en cause importantes. Économiquement, l'augmentation de l'offre en produits manufacturés a imposé une gestion beaucoup plus sévère des coûts. Il est nécessaire de produire une pièce au moindre coût, de manière à rentabiliser à très court terme les investissements industriels, alors que les séries ont des durées de vie plus faibles et que les investisseurs cherchent des revenus rapides.

La très forte contrainte économique provoque des répercussions techniques sur les méthodes de fabrication employées. On doit maintenant prouver que le processus de fabrication retenu est le plus à même de réaliser économiquement le produit. Ainsi, les processus usuels liés à la pratique sont remis en cause et comparés à des processus alternatifs. Cette contrainte a ainsi généré deux attentes industrielles : le besoin d'optimiser les différents paramètres d'un processus donné et la remise en cause et l'évaluation des processus actuels. Des évolutions majeures de procédés existants ou l'apparition de nouveaux procédés ont vu le jour comme l'Usinage à Grande Vitesse ou le Prototypage Rapide (terme de Fabrication Rapide maintenant usité).

Enfin, la contrainte économique a eu des conséquences sur l'implantation industrielle des entreprises en France et dans les pays émergents. Les sites de production sont délocalisés. Le processus de conception et fabrication est ainsi distribué géographiquement et fonctionnellement entre donneurs d'ordre et sous-traitants. On doit alors se demander si un découplage fort entre les études et la fabrication est un facteur de gain ou de perte, sachant que toute l'industrie s'est orientée depuis vingt ans vers l'intégration de ces deux métiers (notion de DFM, *Design For Manufacturing*).

D'un point de vue mécanique, nous constatons que la recherche française aborde la fabrication suivant deux points de vue. Du point de vue scientifique, l'étude des Procédés a pour objectif de formaliser et de comprendre les phénomènes physiques mis en jeu lors de la mise en forme des matériaux. Elle concerne par exemple l'étude de l'interaction entre l'outil et la matière usinée, ainsi que son influence sur la surface obtenue, que ce soit au niveau microscopique ou au niveau macroscopique. Au niveau microscopique, elle fait appel à la modélisation thermomécanique du phénomène, à la simulation et à la comparaison avec l'analyse expérimentale. La particularité de ce phénomène se situe au niveau du couplage entre thermique et plasticité, ainsi qu'au niveau des hautes températures d'interface et des hautes vitesses de déformation. Au niveau macroscopique, on constate que l'augmentation des performances des outils et l'allègement des structures des pièces, engendrent des phénomènes dynamiques instables, qu'il est nécessaire de gérer tout au long du cycle de réalisation de la pièce.

La mécanique trouve ici un champ de recherche pertinent du fait de la complexité de ces phénomènes et de l'interaction entre eux. Associés à la chimie, ces travaux per-

mettent d'améliorer les procédés de fabrication ou d'élaborer de nouveaux procédés. Le développement d'outils de simulation et de procédés de Prototypage/Fabrication Rapide en est l'illustration. Mais l'adaptation industrielle de ces évolutions impose aussi l'adaptation des processus.

L'étude du processus a pour objectif de conduire une recherche sur la mise en œuvre des procédés et l'organisation des actions à conduire pour réaliser un produit respectant un cahier des charges donné. On s'intéresse ici aux méthodes et aux outils. Le processus choisi doit permettre une mise en œuvre optimale des procédés de fabrication. Le développement de l'informatique tant au niveau de la préparation en CFAO que du pilotage des moyens de fabrication a sensiblement modifié ce domaine. L'objectif actuel est de prédire le plus précisément possible, le comportement global du processus, dès la phase de préparation. On peut alors estimer et optimiser les temps de fabrication et les coûts induits. Pour cela, il est nécessaire d'étudier, de modéliser et de simuler les différentes étapes du processus, les relations entre chacune, voire sur le processus global. Le couplage entre les différents problèmes géométriques, de commande ou mécaniques rend cette modélisation particulièrement complexe et suppose une approche multivues.

La recherche sur le processus de fabrication a pour but d'étudier et de formaliser les activités humaines, informatiques ou mécaniques permettant de matérialiser physiquement l'idée d'un objet, pour faire évoluer la pratique industrielle et l'adapter aux contraintes actuelles, en tenant compte simultanément des aspects technologiques, économiques, organisationnels et logistiques. Les travaux de recherche doivent être génériques et accroître la somme des connaissances acquises. L'élaboration du processus de fabrication s'appuie largement sur l'expérience car les connaissances mobilisées restent souvent mal formalisées et sont très souvent contextuelles (à l'entreprise, au matériau, à la géométrie de la pièce, au métier...). Il s'agit de structurer et de formaliser ces connaissances.

La recherche sur le processus de fabrication se différencie aussi du génie industriel, car elle traite particulièrement de l'évolution géométrique et mécanique de la pièce. Le flux étudié est le flux fonctionnel de la pièce qui caractérise son évolution géométrique de la définition fonctionnelle à la réalisation physique.

Pour toutes pièces fabriquées, le processus actuel repose sur deux caractéristiques communes. Premièrement, tout produit est réalisé en utilisant une chaîne numérique qui lie la représentation de la spécification fonctionnelle du produit sous la forme d'un modèle de CAO, à la commande des machines permettant de matérialiser la forme, voire jusqu'au contrôle de celle-ci. Si cette chaîne numérique ne concerne pas la pièce elle-même, elle concerne les outillages nécessaires à sa réalisation (moules, matrices...). Deuxièmement, on cherche à affiner le plus possible les paramètres de réglage du processus. La recherche de performances réduit la plage de réglage possible et l'influence du procédé sur l'état géométrique et de la structure métallurgique de la pièce doit être connue précisément. La gestion de la géométrie de la pièce, de la spécification fonctionnelle au contrôle final est un enjeu critique.

Le processus de fabrication se décompose en quatre étapes importantes de la définition du cahier des charges au contrôle de la pièce finie. Ici, seul l'aspect géométrique du processus est détaillé :

- Étape 1 : conception du produit via la modélisation géométrique de la pièce en fonction du cahier des charges fonctionnel. En fonction d'une idée de méca-

nisme ou de pièce, la maquette numérique du produit est réalisée. Elle devient la référence du produit. Il n'y a pas une exacte bijection entre le cahier des charges fonctionnelles et la maquette numérique, car le besoin fonctionnel ne peut pas être décrit géométriquement.

- Étape 2 : transformation géométrique de la définition du produit. La description de la peau de la pièce est transformée en une géométrie adaptée à la commande du moyen de fabrication (ensemble de trajets d'outils en usinage, par exemple). Cette transformation crée une rupture fondamentale dans le processus, car elle est le résultat d'un algorithme de calcul non bijectif. La pièce fabriquée n'est pas exactement la pièce modélisée.
- Étape 3 : réalisation physique de la forme. Cette étape est le résultat de deux actions : la réalisation des mouvements de l'outil par une machine à commande numérique, en temps réel suivant de grandes vitesses d'avance et l'interaction entre l'outil et la pièce due au procédé de fabrication utilisé.
- Étape 4 : mesure et contrôle de la pièce. Des points sont acquis numériquement sur la pièce pour évaluer l'erreur entre la pièce réelle et la maquette numérique. Toutes les contraintes fonctionnelles ne sont pas mesurables. Certaines contraintes esthétiques ou aérodynamiques ne sont pas suffisamment formalisées pour que les défauts soient quantifiables.

Chaque étape introduit une erreur de transformation, due à l'algorithme de calcul utilisé. Les procédés et moyens de fabrication introduisent aussi des perturbations. Ainsi, la fidélité entre le produit imaginé et le produit réel n'est pas garantie. Les différences générées produisent des répercussions économiques importantes. D'autre part, la maquette numérique présente une représentation incomplète du produit, car les tolérances dimensionnelles et les aspects matériaux et mécaniques ne sont pas pris en compte.

L'étude du processus de fabrication s'encre complètement dans le champ disciplinaire de la mécanique, car il porte sur la réalisation physique d'objets. La première contrainte se situe au niveau du phénomène mécanique mis en jeu lors de la mise en forme du produit. Néanmoins, il existe des interactions fortes avec d'autres disciplines, telles que l'automatique, la robotique, la chimie, les mathématiques et l'informatique.

La réalisation physique du produit introduit une accumulation de défauts. Le procédé et sa mise en œuvre ont une influence macroscopique sur la qualité du produit fabriqué. La mise en œuvre de l'outil et la transformation de la matière engendrent des déplacements, des déformations et des actions mécaniques. Ces phénomènes modifient en particulier la géométrie de la pièce et introduisent des défauts locaux plus importants que les défauts de forme et de rugosité spécifiés. De plus, la machine mettant en œuvre le procédé supporte des sollicitations mécaniques importantes du fait des exigences cinématiques élevées. Enfin, durant le mouvement de l'outil, l'interprétation du programme, le calcul des consignes de déplacement des axes, la mise en mouvement des axes et de la structure produisent des perturbations entre la trajectoire théorique programmée et la trajectoire réelle de l'outil.

Le cumul des défauts introduits par la transformation géométrique du produit et la mise en œuvre du procédé peut aboutir à l'obtention de pièces non conformes. La maîtrise de la qualité géométrique du produit suppose soit la mise en œuvre d'un plan expérimental de correction, soit la prédiction de l'influence de ces phénomènes,

via la modélisation et l'évaluation virtuelle dès l'étape 2. La problématique actuelle de la recherche en fabrication se situe à ce niveau. Elle a pour objectif de définir le degré de précision de la modélisation et de modéliser l'influence des phénomènes mécaniques sur les caractéristiques géométriques de la pièce. Les deux phénomènes prépondérants sont étudiés : le procédé de fabrication et le comportement du moyen de fabrication. Cette simulation est conduite en plusieurs étapes. Tout d'abord, il faut choisir un modèle mécanique du procédé, générique mais suffisamment précis. Puis il faut modéliser géométriquement la réalisation de la pièce. Enfin, il faut élaborer un cadre virtuel de simulation.

Le verrou technologique se situe au niveau de la structuration globale de l'ensemble des phénomènes mis en jeu. Le problème posé concerne la mise en place de leur modélisation cohérente, en définissant le degré de précision des modèles utilisés. Le point de vue est orienté vers la réalisation de séries de produits conformes, dès la première pièce fabriquée.

La thématique centrale de cette communauté est liée à la modélisation et la virtualisation de la fabrication permettant de réduire l'incertain lors de la mise en fabrication. Dans ce groupe l'objectif est d'utiliser une représentation virtuelle du processus pour gagner en robustesse, en qualité et en rapidité et éliminer la boucle de correction utilisée pour corriger la première pièce. Le principal problème consiste alors en la modélisation de l'ensemble du processus de mise en fabrication. Cela suppose d'imaginer des modèles adaptés à chaque élément du système ou chaque phénomène intervenant et à leurs interactions. Or, le processus de fabrication fait intervenir des systèmes informatiques (CFAO, Commande Numérique) et des systèmes mécaniques (structure de machines-outils, phénomènes de coupe). Chaque système appartient à un champ disciplinaire particulier : mathématique appliquée, informatique, asservissements, mécanique des structures, thermomécanique de la coupe, etc., qui a produit son propre corpus de modèles. Il n'est pas possible de regrouper tous ces modèles pour aboutir à une vision complète et précise du processus global de fabrication. De plus, la modélisation indépendante de chaque élément ne permet pas de résoudre les problèmes posés par le processus de fabrication. Seule l'organisation en commun des approches de chaque discipline le permet. Ainsi, la modélisation complète du processus est une thématique de recherche originale, qui repose sur les travaux menés dans chaque champ disciplinaire. Néanmoins, elle doit proposer une approche différente et ses propres modèles pour lier l'ensemble des problématiques.

La thématique de *L'Usinage à grande vitesse* sera abordée dans le cadre de cet ouvrage en faisant principalement référence aux axes :

- Évolution des moyens de fabrication
- Évolution de la modélisation du procédé d'usinage avec et sans vibration
- Évolution des méthodes de programmation des trajectoires d'usinage

Introduction	1
--------------	---

A

Évolution des moyens de fabrication

1 • Analyse structurelle d'une machine d'usinage	7
1.1 Introduction	7
1.2 Analyse structurelle d'une machine d'usinage	9
2 • Système de génération du mouvement de coupe	12
2.1 Les porte-outils	12
2.2 Les électrobroches UGV	14
3 • Système de génération du mouvement d'avance	19
3.1 Typologie des machines UGV	19
3.2 Le bâti	26
3.3 La technologie des axes de déplacement	38
3.4 La motorisation des machines-outils	42
3.5 Optimisation du pilotage des machines	53
4 • Modélisation géométrique des machines UGV : Espaces de travail	71
4.1 Espace de travail géométrique	71
4.2 Espace de travail cinématique	72
4.3 Espace de travail dynamique	72
4.4 Transformation géométrique inverse	74
4.5 Méthodes pour la définition du modèle géométrique	75
4.6 Méthode de Merlet spécifique aux mécanismes à structure parallèle	82
4.7 Conclusion	86

5 • Modélisation cinématique des machines UGV	87
5.1 Introduction	87
5.2 Notion de bases pour la modélisation cinématique d'une machine-outil UGV	89
5.3 Modélisation du comportement des machines-outils UGV	92
5.4 Comparaison avec un directeur de commande numérique industriel	105
5.5 Synthèse	108
6 • Modélisation dynamique des machines UGV	109
6.1 Introduction	109
6.2 Démarche de modélisation	110
6.3 Analyse modale d'un modèle éléments-finis	112
6.4 Modèles simplifiés à constantes localisées	114
6.5 À propos des phénomènes de frottements	118
6.6 Conclusion	119
7 • Optimisation du pilotage des machines	121
7.1 Évolution des Commandes numériques	121
7.2 Simulation des machines	123
7.3 L'approche ICAM	124

B

Outils et méthodes d'analyse d'un processus de coupe sans vibration

8 • Usinage et coupe	129
8.1 Introduction	129
8.2 Problématique générale de la coupe	131
8.3 Historique de la coupe des métaux	132
9 • Usinabilité	142
9.1 Tentative de définition	142
9.2 Quantification de l'usinabilité	145
9.3 Les mécanismes de formation du copeau	155
9.4 Usinage avec et sans fluide de coupe	159
10 • Modélisation et instrumentation des efforts de coupe	164
10.1 Modélisations des efforts de coupe	164
10.2 Instrumentation des opérations d'usinage	174

Outils et méthodes d'analyse d'un processus de coupe avec vibration

11 • Principales sources de vibration au sein d'une structure d'usinage	183
11.1 Notions de base pour l'analyse vibratoire du système usinant	183
11.2 Causes de déformation du système usinant	187
12 • Le broutement, phénomène prépondérant en usinage	193
12.1 Introduction	193
12.2 Analyse qualitative de l'instabilité engendrée par broutement	193
12.3 Modélisation du broutement en vue du choix de conditions de coupe	195
12.4 Comment aborder un calcul de broutement en pratique ?	204
13 • Les enjeux actuels de l'industrie et de la recherche	219
13.1 Un premier objectif : vers une meilleure conception et utilisation des broches	219
13.2 Un deuxième objectif : vers une maîtrise des vibrations	223
13.3 Un troisième objectif : vers le développement d'approches de type « expérimentation/simulation »	238
13.4 Un quatrième objectif : vers une utilisation positive des vibrations	249

Évolution des méthodes de programmation

14 • Description et programmation des trajectoires d'usinage	261
14.1 La chaîne numérique en Fabrication Assistée par Ordinateur	261
14.2 Les formats de description des trajectoires	262
14.3 L'interpolation polynomiale dans la chaîne numérique	263
14.4 Développements autour de l'interpolation polynomiale	265
14.5 Comportement cinématique	271
14.6 Évolution des moyens de programmation	276

15 • Évolution des méthodes de programmation en fraisage 2.5 axes	280
15.1 L'arrondissement des trajectoires	280
15.2 L'usinage des poches	281
15.3 L'usinage par contournage	287
15.4 L'usinage des pièces flexibles	288
15.5 Le tréflage	291
15.6 L'usinage trochoïdal	296
16 • Évolution des méthodes de programmation en fraisage 3 axes des moules et matrices	299
16.1 Point de vue géométrique	299
16.2 Les stratégies d'usinage	306
17 • Évolution des méthodes de programmation en fraisage 5 axes des formes complexes	311
17.1 Intérêt de l'usinage à 5 axes	311
17.2 Machines d'usinage à 5 axes	312
17.3 Comportement cinématique des machines à 5 axes	315
17.4 La chaîne numérique de programmation	325
17.5 Description du procédé	326
17.5 Usinage à 5 axes en bout	327
17.6 Usinage à 5 axes sur le flanc	331
17.7 Conclusion	336
18 • Optimisation des trajectoires d'usinage	337
18.1 Redéfinition du problème de calcul des trajets d'usinage	337
18.2 Calcul de trajectoires par optimisation sous contraintes : exemple d'une opération d'ébauche de poches en fraisage 2.5 axes	340
18.3 Maximisation de la vitesse d'avance outil/pièce en fraisage 5 axes	353
Bibliographie	369
Index	387

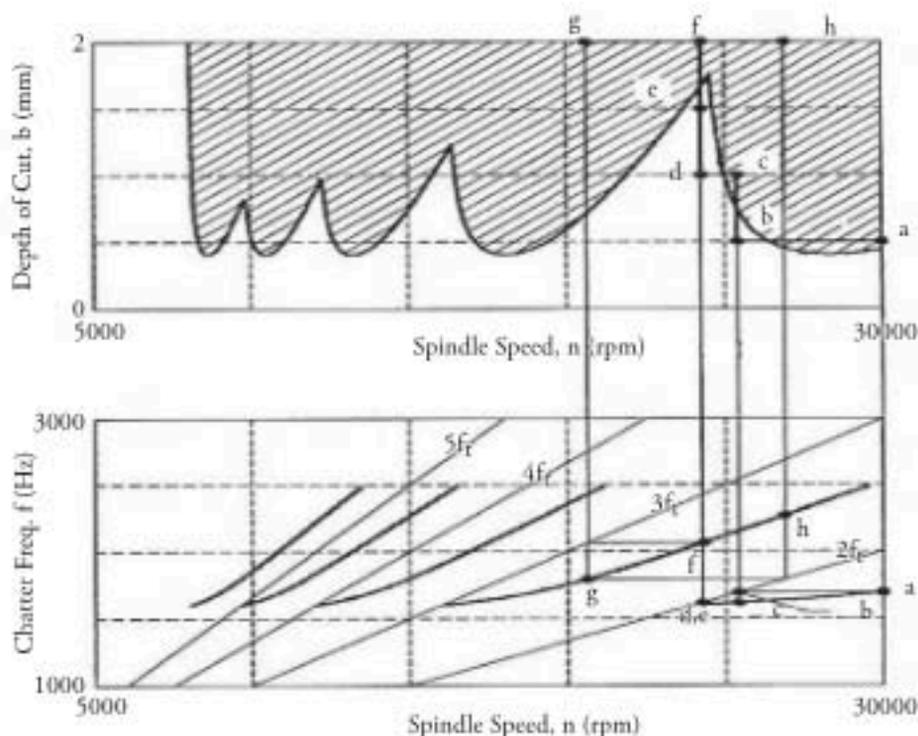


Figure 12.19 – Mouvements mesurés de la pièce : cas d'un usinage stable

Une augmentation supplémentaire de l'engagement axial a_p conduirait à un essai instable (point f) sans que de nouveaux points stables puissent être obtenus. Les conditions aux points g et h étant instables, le point e est retenu comme point stable optimal. Cette méthodologie permet en général de converger vers une solution d'usinage stable. Il n'en demeure pas moins qu'elle nécessite la mise en place d'essais pouvant conduire à des situations de coupe parfois dangereuses pour l'outil et son environnement.

■ Compromis entre l'approche itérative et l'approche prédictive

Pour définir des conditions de coupe stable, il est bien souvent nécessaire de réaliser des usinages tests au cours desquels il est possible d'enregistrer le son émis en cours d'usinage. La plupart des logiciels propose cette fonctionnalité, c'est au moins le cas pour le logiciel Cutpro® (<http://www.malinc.com>), le logiciel Harmonizer, le logiciel AccordMill (ELPS) ou encore la solution SmartiBox spécialisée dans les problèmes de surveillance vibratoire (Logiciel de l'Ecole Centrale de Nantes (IRCCyN)) dont nous reparlerons au § 13.2.2.

Dans tous les cas, la meilleure solution est celle qui permet d'une manière ou d'une autre de confronter voire d'utiliser simultanément les différentes approches pour faire des compromis. L'objectif est alors de sélectionner des conditions de coupe évitant l'apparition de broutement, et conduisant à un régime de vibration forcé dont les amplitudes de vibration sont faibles.

12.4.3 Sensibilité du seuil de stabilité aux paramètres dynamiques du système usinant

Dans cette partie, nous considérons que le système usinant se comporte comme un système à un degré de liberté (1 mode prédominant). On peut imaginer un cas d'usinage marqué par une direction de vibration privilégiée. Les valeurs des paramètres dynamiques du système usinant sont issues de l'analyse de la FRF obtenue par sonnage (§ 12.3.2) : raideur statique, fréquence propre, amortissement.

On s'intéresse dans ce qui suit à l'influence de ces derniers paramètres sur la limite de stabilité simulée.

■ Influence de la raideur statique

L'effet de la raideur statique sur la limite stable/instable est évident : un système possédant des valeurs de rigidité élevées va permettre l'utilisation de valeurs de profondeurs de passe plus hautes que dans le cas d'un système plus souple. Ainsi, sur le tracé des lobes de stabilité, la limite de stabilité se décale vers le haut lorsque la raideur statique augmente (figure 12.20). L'usineur comprend ainsi par le calcul ce qui est évident en pratique. La plupart du temps, lorsqu'il raccourcit la longueur d'un outil, celui-ci semble être beaucoup plus rigide. Les graphiques suivants sont issus de simulations réalisées pour le tournage d'un acier dont le coefficient spécifique de coupe est de 1 500 MPa. Cet exemple est un exemple purement numérique juste destiné à indiquer les tendances de variation.

La différence de raideurs statiques pour les deux cas simulés est de l'ordre de 45 %. Le même ordre de grandeur pour la limite de stabilité (a_p) est observé. Cela correspond au décalage vertical entre les deux seuils limites de la zone stable. Il est donc naturellement recommandé de s'assurer d'une raideur maximale au niveau du système Pièce/Outil/Broche.

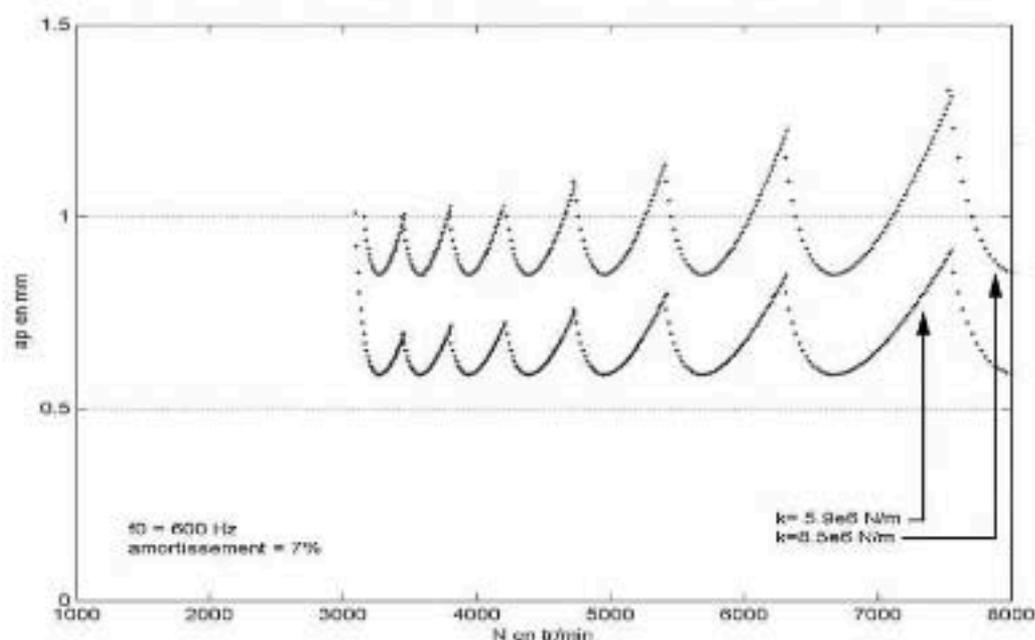


Figure 12.20 – Effet de la rigidité du système sur la limite de stabilité

■ Influence d'une variation de fréquence propre

L'effet de la fréquence propre du mode vibratoire du système est illustré sur la figure 12.21 ; La zone critique entre stabilité et instabilité se décale cette fois selon l'axe horizontal. Ce décalage est très net alors que la variation de fréquence propre du système évolue faiblement (600 Hz à 630 Hz, soit 5 %). Si on considère un point de fonctionnement correspondant à une profondeur de passe de 0,75 mm et une vitesse de rotation de 6250 tr/min, les lobes de stabilités obtenus pour un mode propre à 600 Hz indiquent que l'opération sera stable puisque ce point est situé en dessous de la courbe. Lorsque la fréquence de résonance passe de 600 à 630 Hz, les lobes se décalant, ce point n'est plus sous la limite critique de stabilité. Cela signifie que l'opération devient alors instable. Notons que la variation de fréquence propre simulée ici est faible : 5 %. Le résultat de cette variation sur l'opération est d'un tout autre ordre ; dans la pratique, la fréquence propre pour un mode et un système usinant donné n'est pas constante dans le temps. En effet, il a été constaté que la variabilité lié au serrage, au montage/démontage de l'outil et/ou de la pièce, à la longueur de prise de l'outil, au changement de température de la broche, etc., peuvent générer des variations de fréquences propres au-delà de 5 %.

Dans ce cas, on comprend aisément qu'un point de fonctionnement stable à un moment donné puisse devenir instable suite à un changement de fréquence propre du système du à des paramètres non contrôlés par l'opérateur.

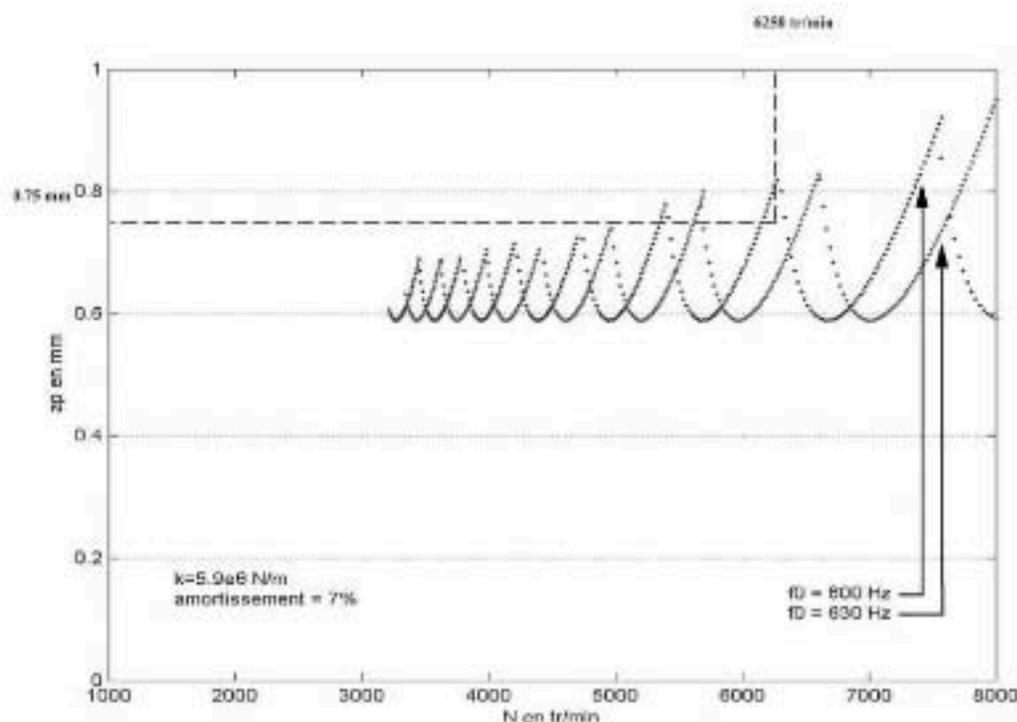


Figure 12.21 – Effet de la fréquence propre principale du système sur la limite de stabilité

■ Influence de l'amortissement

Une variation de l'amortissement du mode de vibration principal va comme dans les cas précédents générer un décalage de la limite de stabilité. Ce décalage est principalement vertical mais également horizontal. Comme illustré par les deux simulations présentées ci-dessous, une augmentation de l'amortissement va permettre des profondeurs de passe plus importantes. En pratique, des solutions de porte-outils à fort amortissement existent et permettent d'accroître sensiblement les profondeurs de passe dans des conditions de coupe stables (§ 12.3.3). Le potentiel amortissant d'un outil est fortement lié à la nature et la combinaison des matériaux utilisés dans le porte-outil ou dans les conditions de bridage de la pièce.

La réponse dynamique du système usinant doit être mesurée en prenant d'importantes précautions. Prévoir la limite de stabilité passe par une définition précise des paramètres évoqués précédemment. Pour un point de fonctionnement stable donné (a_p , N), un changement même faible des caractéristiques dynamiques du système peut faire évoluer ce point vers une situation instable. Il est donc recommandé de qualifier l'opération du point de vue de sa variabilité dynamique. Il peut s'en suivre des recommandations quant au serrage de l'outil à la clé dynamométrique, la température du système broche/outil, la longueur en prise de l'outil et sur tout autre paramètre susceptible d'engendrer une variation de la FRE. Nous allons maintenant utiliser toutes les notions évoquées dans les deux premiers paragraphes de ce chapitre pour donner un petit aperçu des sujets vibratoires qui requiert actuellement l'attention des professionnels mais aussi celle de la communauté scientifique académique.

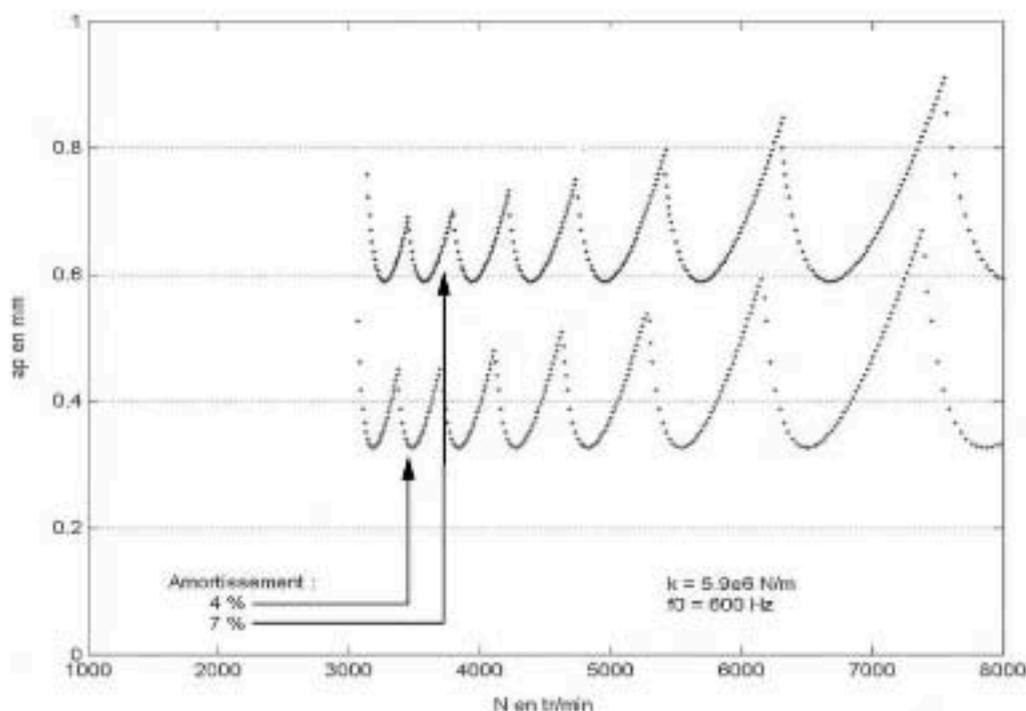


Figure 12.22 – Effet de l'amortissement du mode propre prépondérant sur la limite de stabilité

13 • LES ENJEUX ACTUELS DE L'INDUSTRIE ET DE LA RECHERCHE

J.-P. COSTES, V. GAGNOL, F. LAPUJOLADE, A. LARUE,
G. MORARU, H. PARIS, M. RITOU

13.1 Un premier objectif : vers une meilleure conception et utilisation des broches

13.1.1 Introduction : Conception et Analyse structurelle des broches

La maîtrise du cycle de vie et de la fiabilité des machines-outils représente un enjeu industriel majeur pour limiter les coûts de fonctionnement global. Parmi les éléments constitutifs des machines UGV, l'électrobroche a une incidence prépondérante sur les coûts de maintenance et sur la disponibilité. Les électrobroches UGV sont des éléments sensibles en terme de durée de vie car elles sont les sous-systèmes les plus complexes et les plus sollicités d'une machine-outil. On estime qu'elles sont responsables d'environ 30% du coût d'exploitation des machines UGV de l'industrie automobile.

13.1.2 Comportement dynamique des électrobroches UGV

Bien qu'appartenant à une gamme très répandues des systèmes mécaniques de type « rotor », les broches de machine-outil ne sont que très rarement modélisées ou caractérisées comme telle. En effet, à des vitesses conventionnelles de rotation, qui caractérisent les broches d'usinage traditionnelles, la fonction de réponse en fréquence est très similaire à celle du système non tournant. Une modélisation dynamique de système non tournant est donc suffisante. Cependant, avec l'augmentation des fréquences de rotation, qui caractérise les électrobroches UGV, les effets gyroscopiques et d'inertie deviennent plus prononcés et rendent le comportement dynamique de la broche dépendant de sa fréquence de rotation. Ces phénomènes dynamiques, propres aux rotors, ont fait l'objet d'études approfondies depuis de nombreuses années [Nelson 76], [Reddy 87], [Brandon 92], [Shin 92], [Childs 93], [Genta 95], [Lalanne 01].

La modélisation dynamique des broches de machine-outil n'est pas aisée du fait des précisions exigées et des couplages importants entre les multiples degrés de liberté des différentes entités structurales qui composent ces systèmes. Un modèle de connaissance du comportement dynamique de broche nécessite l'intégration des modèles de l'arbre de broche, des roulements, du corps de broche mais aussi de l'outil, des interactions avec la pièce à usiner et de la structure de la machine entière. Les propriétés dynamiques d'une broche sont influencées par un grand nombre de facteurs comme les caractéristiques du porte-outil [Agapiou 95], la géométrie de l'arbre de broche et du système de serrage [Smith 98], ainsi que par les rigidités et amortissements apportés

5 axes 9, 19, 79

A

accélération 362
 accélération centripète 98
 accélération curviligne 97
 accélération tangentielle 97
 actions mécaniques 292
 air comprimé 161
 air réfrigéré 161
 analyse modale 112
 analyse structurelle des broches 219
 analyse vibratoire 183
 angle d'hélice 167, 172
 angle de coupe 169
 angle de direction d'arête 165
 anticipation 61
 approche de type expérimentation/
 simulation 238
 approche itérative 213
 arrondissement des trajectoires 280
 arrosage 162
 autopilotage 49
 avance 165
 axes de déplacement 10, 38
 axes de rotation 314

B

bâti 26
 bloc linéaire 95
 broutement 193
 Bsplines 263

C

capabilité des machines-outils 21
 capacité calorifique des fluides 160
 capteur à jauges de déformation 175
 capteur rotatif 175

caractéristique cinématique 293
 carbures primaires 154
 cavités 283
 céramique 134
 certification 339
 CFAO 8
 changement de direction 280
 cisaillement 138
 collision 325, 331
 commande d'axe 54
 commande numérique 261
 commande prédictive 69
 commande scalaire 47
 comportement 92
 comportement cinématique 121, 271
 comportement dynamique 31
 conception 39
 Conception Assistée par Ordinateur
 (CAO) 261, 265
 conductivité thermique 150
 continuité de coupe 172
 contournage 288
 contrainte 362
 contraintes de conception 345
 contraintes de fabrication 346
 contre dépouille 311
 contrôle direct de couple ou DTC 47
 copeau mini 288
 coupe assistée par vibrations 249
 Couple Arête Matière (CAM) 169
 courant couple 177
 courbure 97, 271, 364
 coût de fabrication 337
 critères indirects 145

D

débit copeaux 140, 293
 diamant polycristallin 135

Directeurs de Commande Numérique (DCN) 121
 discontinuité 91
 discontinuité en courbure 103
 discontinuité en tangence 101
 durée de vie 298
 dynamomètre piézoélectrique 175

E

ébauche 292
 effort de coupe 164, 170
 électrobroche 14
 émulsion 160-161
 entrée-sortie 282, 286, 291
 épaisseur coupée 165-167, 169
 épaisseur de copeau 288
 erreur de corde 262
 erreur de traînage 65
 espace de travail 20, 313
 espace de travail cinématique 72
 espace de travail dynamique 72
 espace de travail géométrique 71
 espace de travail optimal 73
 évacuation des copeaux 160, 280
 évidement de poche 282-283

F

fabrication 123
 Fabrication Assistée par Ordinateur (FAO) 261, 266
 facette 309
 filtres de consigne 62
 finition 292
 flexibilité 277
 fluide de coupe 159, 162
 fonction de transfert 186
 fonction objectif 343, 347
 fonctions contraintes 347
 formalisme RST 68
 formats de description des trajectoires 121
 formulation de contraintes 337
 fraisage 2.5 axes 280
 fraisage 3 axes 299
 fraisage 5 axes 311
 fraisage en bout 311
 fraise cylindrique 300
 fraise hémisphérique 300

fraises à pas différentiel 289
 fraises à pas variable 289
 fraise torique 300
 fréquences de broche 140
 frottement 55, 67

G

glides et delta 21
 glissières prismatiques 39

H

hauteur de crête 262, 301, 305, 323, 364
 hexapode 21
 huile entière 160
 huile soluble 160

I

identification directe 169
 identification expérimentale 66
 identification inverse 170
 inclinaison 363
 instrumentation 174
 Intelligent Computer Aided Manufacturing (ICAM) 124
 interférence globale 327
 interpolateur de consigne 61
 interpolation linéaire 262
 interpolation polynomiale 262
 isocrête 310
 isolation vibratoire 30
 isoparamétrique 307

J

jerk 10, 89, 362
 jerk centripète 97
 jerk contrôlé 97
 jerk curviligne 97

L

largeur de coupe 169
 lobes de stabilité 199
 localisation de déformation 138
 loi de coupe 167, 171
 lois de vitesse 10
 lubrification 159

M

machine
 à structure parallèle 21
 multifonctions 24
 parallèle 24
 machine-outil 5 axes 79
 machine-outil à structure parallèle 74, 84
 machine-outil à structure sérielle 74
 machines-outils à commande numérique (MOCN) 121
 matériau de coupe 132
 matériaux 28
 matériaux réfractaires 138
 matrice 300
 mesure de la puissance 176
 mesure des efforts 174
 métaux de coupe
 durée de vie 298
 méthode d'Euler 61, 69
 méthode de Denavit-Hartenberg 77
 méthode de Merlet 82
 micro lubrification 159, 161
 Minimum Quantity of Lubricant (MQL) 161
 modèle 143, 164
 modèle d'usure 139
 modèle géométrique 318, 320
 Modèle Géométrique Direct (MGD) 75
 Modèle Géométrique Inverse (MGI) 75
 modélisation 164
 modélisation cinématique 87
 modélisation de la vitesse 95
 modélisation des efforts 167
 modélisation dynamique 109
 modélisation géométrique 71
 modélisation par discrétisation 164
 modélisation par éléments finis 111
 modes souples 58, 67
 mode vibratoire 110
 moindre carré 268
 morphologie d'un copeau 139
 moteur
 à reluctance variable 52
 couple 41, 51
 courant continu 43
 linéaire 40, 51
 motifs d'usure 145
 motorisation 42
 moule 300

mouvement incohérent 321
 multi-poche 282

N

nitru de bore cubique 135
 niveaux en Z 282
 nouvelles architectures 9
 Nurbs 263

O

obliquité d'arête 169
 opérateur homogène 75
 opération d'ébauche 296
 optimisation 362
 outil cylindrique 330
 outil hémisphérique 330
 outil torique 330
 overcut 332

P

paroi mince 289
 perçage vibratoire 251
 performance des axes de déplacement 9
 performances dynamiques 63
 performances statiques 65
 pièce flexible 288
 pièces unitaires 123
 pivotement 363
 planification de la vitesse 92
 plans parallèles 282, 306
 platine de tournage 175
 poche 281, 286
 points de fonctionnement valides 130
 point singulier 316
 pôle 268
 porte-outil 12
 post-processeur 261, 278, 326
 problème d'optimisation 340
 processus 339
 productivité 293
 profil de vitesse 97
 profondeur de passe 165
 programmation 280
 programmation en inverse du temps 359
 protection 41
 puissance électrique 176
 pyromètre 178

R

rayon de bec 165
 rayon de raccordement 169
 réduction du frottement 160
 reprise 24
 reprise d'usinage 280, 284
 respect de la qualité 337
 rigidité 294
 roulement à bille 16
 RST (formalisme) 68

S

section coupée 164
 section de copeau 285
 section de copeaux constante 280
 servomoteur 55
 Shop Floor Programming (SFP) 276
 simulation 123
 singularité 321
 spécification 339
 spirale 282
 spline 122, 297
 STEP-NC 277
 stratégie d'usinage 280, 300
 structure cascade 61
 surépaisseur de finition 280
 surface offset 303
 surfaces réglées développables 331
 surfaces réglées non développables 331
 surveillance 177
 surveillance vibratoire 231
 synchronisation 308
 système usinant 184

T

tangence 281
 techniques à sections coupées
 constantes 164
 techniques à sections coupées variables 164
 température 178
 temps d'usinage 337
 thermocouple 178

toile de fond 289
 tolérance d'usinage 301, 305, 323
 tournage orthogonal 170
 trajet cinématiquement admissible 338
 trajet cinématiquement optimal 338
 trajet économiquement optimal 339
 trajet fonctionnellement admissible 338
 trajet géométriquement admissible 338
 trajet mécaniquement admissible 338
 transformation de coordonnées 316
 transformation géométrique inverse 74
 transition de bloc 100
 tréflage 291

U

undercut 332
 usinabilité 143
 usinage à sec 159, 162
 usinage en avalant 289
 usinage en opposition 289
 usinage pleine matière 280
 usinage trochoïdal 296

V

variateur de vitesse 44
 vibration 179, 185, 293, 294
 vis à billes 40, 54
 vitesse 362
 modélisation 95
 planification 92
 vitesse de coupe 137, 286, 330
 vitesse de parcours 281
 volume de travail 22

W

wattmètre 176

Z

Z-level 307
 zone de cisaillement primaire 155