

Christophe Tournier *et coll.*

USINAGE À GRANDE VITESSE

Technologies • Modélisations • Trajectoires

L'USINENOUVELLE

DUNOD

Consultez nos parutions sur dunod.com



Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements

d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour

les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée. Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



© Dunod, Paris, 2010
ISBN 978-2-10-055472-0

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

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

PRÉFACE

Après vingt ans de développement et d'innovation dans les éléments multiples qui le constituent, l'Usinage Grande Vitesse (UGV ou UTGV) est maintenant arrivé à maturité. Les utilisateurs comme les fournisseurs ont aujourd'hui pleinement exploité les nombreux avantages économiques et techniques de cette technologie d'UGV. L'industrie a fourni les moyens nécessaires pour pouvoir travailler dans ce nouvel environnement qui a grandement participé à la réduction des coûts de production et qui entre autres a permis de ralentir les délocalisations dans le domaine de l'usinage. L'usinage grande vitesse est aujourd'hui très largement utilisé dans toute l'industrie mécanique, principalement dans l'aéronautique, l'automobile, la fabrication de moules, le décolletage, l'électronique, le médical, l'horlogerie et également dans l'industrie du bois et des composites.

Les nombreux moyens de production ne sont cependant pas toujours utilisés de façon optimale et des progrès sont encore à réaliser. Les industriels ont maintenant besoin du support des universités technologiques pour les aider à cerner de plus près et à améliorer le processus UGV.

Ce premier document en français sur l'UGV est l'aboutissement d'une réflexion du groupe de travail Manufacturing 21 comprenant 16 laboratoires ; il nous propose une approche technique et scientifique sur les divers domaines suivants : la modélisation du processus UGV, la maîtrise du comportement des machines, l'optimisation des conditions opératoires, la fabrication virtuelle, le développement de nouvelles méthodes de fabrication et l'instrumentation des broches et des machines.

Ce livre nous donne des informations nouvelles qui vont nous permettre d'évoluer et de progresser dans la compréhension des différents phénomènes pour que la technologie de l'UGV puisse continuer son développement rapide...

Alain Auffret
Président de l'AUTGV¹

28 janvier 2010

1 L'AUTGV (Association pour l'Usinage à Grande Vitesse) constituée d'environ 40 membres actifs francophones, dont 75 % d'industriels et 25 % d'universitaires, a grandement participé au développement de cette technologie. Par des échanges techniques, des expérimentations et la participation à l'organisation de nombreuses conférences, elle a permis un transfert rapide et toujours permanent, des informations dans toute l'industrie française.

www.autgv.com – Directeur technique PRECISE France

TABLE DES MATIÈRES

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

C

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

D

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	385

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

A

Évolution des moyens de fabrication

Coordinateur : E. DUC

1 • ANALYSE STRUCTURELLE D'UNE MACHINE D'USINAGE

E. DUC, J.-Y. HASCOËT

A

ÉVOLUTION DES MOYENS DE FABRICATION

1.1 Introduction

Cette partie est dédiée à l'évolution des moyens de fabrication. La très forte contrainte économique actuelle provoque des répercussions techniques sur les méthodes de fabrication employées et sur les moyens de fabrication. En effet, l'industrie propose deux réponses à la demande de réduction des coûts de fabrication : l'augmentation des performances, visant à réduire le temps de fabrication ou la délocalisation.

Ainsi, la recherche de la performance optimale d'un moyen de fabrication est un objectif majeur pour les ateliers de fabrication. On doit donc maintenant prouver que le processus de fabrication retenu est le plus à même de réaliser économiquement le produit.

L'usinage à grande vitesse et l'augmentation de performance associée ont réellement émergé au début des années 2000, avec une communication active des fabricants d'outils de coupe et de machines-outils. L'usinage à grande vitesse s'est développé grâce à la conjonction de deux phénomènes positifs :

- l'augmentation de la vitesse de coupe permet une coupe plus franche, qui améliore l'état de surface et permet d'usiner certains matériaux exotiques ;
- l'augmentation de la vitesse de coupe réduit drastiquement le temps d'usinage et apporte des gains de productivité importants.

En termes de coupe, le passage de l'usinage conventionnel à l'UGV modifie le comportement thermomécanique de l'interface outil/pièce. De nombreuses thèses ont permis de mieux comprendre ce phénomène. Simplement, nous considérons que la vitesse de déformation du copeau est suffisamment grande pour limiter les transferts thermiques entre l'interface outil/pièce, le cœur de l'outil et de la pièce. D'une part, on considère que le phénomène de coupe est donc adiabatique. L'UGV modifie alors profondément l'état métallurgique et mécanique du matériau usiné en surface. L'état de surface est amélioré. D'autre part, l'augmentation de la vitesse de coupe se traduit par une augmentation associée de la vitesse d'avance parce que la valeur de l'avance à la dent reste comparable. Le gain de productivité est alors direct.

Dans les années 1960, les scientifiques considéraient qu'il existait « une vallée de la mort » dans laquelle ne devaient pas se trouver les conditions d'utilisation de l'outil. En traçant l'évolution de l'usure de l'outil en fonction de la vitesse de coupe, les scientifiques considéraient que l'augmentation de la vitesse de coupe induisait une augmentation de l'usure jusqu'à atteindre une plage de valeurs paroxysmiques rendant l'outil inutilisable, correspondant à la vallée de la mort. Puis si on augmentait

alors encore franchement la vitesse de coupe, l'outil redevenait utilisable et on atteignait le nirvana de l'UGV. Ce concept était séduisant pour illustrer la rupture entre usinage à grande vitesse et usinage conventionnel. Hélas, les recherches et la pratique industrielle ont montré que la réalité est beaucoup plus complexe. En particulier, la vallée de la mort n'existe pas et le passage entre usinage conventionnel et usinage à grande vitesse est plutôt continu et lié plus à un ensemble d'évolutions technologiques qu'au niveau de la coupe proprement dit.

Mais la coupe UGV n'est possible que s'il existe des machines capables d'engendrer des vitesses de coupe et des vitesses d'avance suffisantes. Ainsi, l'UGV en production ne peut être abordé que par la mise en place d'une cellule d'usinage (machine-outil/montages/outils) cohérente intrinsèquement et vis-à-vis du matériau usiné.

Nous considérons que l'usinage à grande vitesse n'est pas à proprement dit un facteur de rupture technologique à lui seul. Passer à l'UGV n'apporte pas nécessairement un bénéfice important et un facteur de pérennité industrielle. L'UGV est une évolution très recommandée pour l'industriel qui cherche à augmenter la qualité des surfaces usinées. Elle est aussi possible pour améliorer la productivité, mais n'est pas l'unique voie de progrès.

En guise d'illustration, prenons un cas industriel de l'aéronautique. Le problème consiste à choisir des conditions de coupe pour réaliser une opération d'enlèvement de matière dans l'aluminium. Le client possède deux broches sur une machine à portique : l'une tournant à 4 000 tours/minute et l'autre tournant à 18 000 tours/minute. Toutes deux ont une puissance de 40 kW. Il s'agit alors de savoir quelle broche utiliser et donc, s'il faut passer à l'UGV, pour ébaucher la pièce. Après étude, nous constatons que la différence entre usinage conventionnel et UGV n'est pas si flagrante. En effet, le gain en vitesse d'avance lié à l'augmentation de la vitesse de coupe est compensé par l'augmentation de la profondeur de passe en ébauche usuelle. Ainsi, nous insistons sur le fait qu'il n'existe pas une règle unique et que le passage à l'UGV doit être conduit au cas par cas, en fonction des moyens mis en œuvre par l'entreprise. Dans le cas présenté, l'anecdote ajoute qu'il n'existait pas de changeur d'outils sur la broche UGV et que vu la longueur de la machine, le temps gagné par l'UGV était largement perdu au changement de l'outil. Néanmoins, l'introduction de l'UGV comme technologie envisageable a eu un apport annexe fondamental. Il a permis de remettre en cause les méthodes acquises dans les entreprises. Vu les coûts d'investissement et la rigueur nécessaires à l'élaboration d'une gamme d'usinage UGV, l'UGV a imposé de critiquer et de rationaliser les méthodes de préparation et d'organisation. Ainsi le gain apporté se situe autant sur la qualité des surfaces usinées, que sur la propreté des ateliers, la rigueur de la gestion des outils ou l'introduction de systèmes de CFAO adaptés.

En termes de procédé de coupe, nous estimons que seul l'usinage de matériaux aéronautiques, comme le titane ou l'inconel sont actuellement effectués en UGV. L'usinage de l'aluminium ou d'alliage de cuivre l'est aussi, mais la plage de conditions de coupe utilisable est si grande que cela ne pose pas de difficultés. Il en est de même pour l'usinage de finition des aciers durs. Dans ce cas, la technologie est plutôt dans une étape intermédiaire. Il faudrait atteindre de plus grandes vitesses de rotation du fait du diamètre des outils utilisés. Mais, l'ensemble du métier de l'usinage a bénéficié des évolutions conduites sur les outils, les machines, les logiciels et les méthodes. Ainsi, la rupture entre UGV et conventionnel n'existe pas. Les entreprises identifient la solu-

tion qui leur est proprement la meilleure, à partir de calculs technico-économiques rationnels. La rupture se situe dorénavant entre les entreprises qui ont une approche rationnelle de la fabrication et celle qui conserve une approche empirique.

La suite de ce chapitre a pour but d'illustrer ce propos en montrant comment on peut aborder rationnellement un moyen d'usinage à partir de considérations liées aux technologies utilisées.

1.2 Analyse structurelle d'une machine d'usinage

Le moyen de fabrication joue un rôle majeur dans le processus, puisqu'il permet de réaliser effectivement la forme. Il est le système qui permet de traduire physiquement dans la matière la représentation de l'objet exprimée dans un modèle virtuel de CAO. Le moyen de fabrication doit donc concilier la commande générée par le domaine virtuel avec les lois de la mécanique. Il a pour but de calculer des lois temporelles de mouvement des éléments de la machine à partir de trajets calculés informatiquement. De plus, lors de la fabrication, le moyen est perturbé par la réalité physique, c'est-à-dire par l'ensemble des sollicitations mécaniques liées soit au procédé de fabrication, soit aux mouvements programmés.

Depuis le début des années 1990, les moyens de fabrication ont subi des évolutions très importantes pour prendre en compte les évolutions économiques et sociales de la fin du xx^e siècle. Techniquement, les évolutions vont toutes vers l'augmentation des performances des machines, leur diversification et la concurrence entre les procédés. Un moyen de fabrication peut être vu comme l'union de deux systèmes :

- des systèmes mécaniques permettant de mettre en œuvre le procédé de fabrication ;
- des systèmes mécaniques permettant de décrire les mouvements nécessaires à la génération de la forme.

Dans le cadre de l'usinage, une machine-outil est le résultat du couplage de ces deux systèmes.

Les machines-outils ont évolué ces dernières années dans deux directions :

- l'augmentation sensible des performances des axes de déplacement ;
- la proposition de nouvelles architectures de machines-outils comme les machines à structure parallèle ou de tournage fraisage.

La capacité à générer les mouvements d'une machine est directement liée à son architecture, c'est-à-dire à la mise en position relative des différents mouvements par rapport au bâti. Les machines-outils usuelles comportent au minimum 2 (cas du tournage) ou 3 axes (cas du fraisage). Actuellement, de nouvelles machines multi-axes d'au moins 5 axes sont disponibles sur le marché. Elles permettent soit de réduire le nombre de posages de la pièce en réalisant plus d'opérations sans démontage de la pièce, soit de réaliser plus facilement certaines formes. La figure suivante présente deux machines-outils actuellement disponibles sur le marché (figure 1.1). Les constructeurs de machines ont imaginé des architectures très différentes en fonction du type de fabrication réalisée. Le besoin principal est toujours de proposer des machines produisant des pièces conformes aux spécifications en réduisant les temps d'usinage. Ainsi pour les petits moules, par exemple, les machines sont essentiellement du type