



**HAL**  
open science

## Modélisation d'axe de machine outil pour la simulation du suivi de trajectoires en UGV

David Prévost, Sylvain Lavernhe, Claire Lartigue

► **To cite this version:**

David Prévost, Sylvain Lavernhe, Claire Lartigue. Modélisation d'axe de machine outil pour la simulation du suivi de trajectoires en UGV. 11ème colloque National AIP PRIMECA La Plagne, Apr 2009, La Plagne, France. 13p. hal-00999712

**HAL Id: hal-00999712**

**<https://hal.science/hal-00999712>**

Submitted on 3 Jun 2014

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## MODELISATION D'AXE DE MACHINE OUTIL POUR LA SIMULATION DU SUIVI DE TRAJECTOIRES EN UGV

**David Prévost (1), Sylvain Lavernhe (1), Claire Lartigue (1, 2)**

(1) Laboratoire Universitaire de Recherche en Production Automatisée, ENS Cachan, Université Paris Sud 11, 61 avenue du Président Wilson, 94235 Cachan cedex, France.

(2) IUT de Cachan - Université Paris Sud 11, 9 avenue de la division Leclerc, 94234 Cachan cedex, France.  
[nom@lurpa.ens-cachan.fr](mailto:nom@lurpa.ens-cachan.fr)

### Résumé :

*Le processus de réalisation des pièces de formes complexes par Usinage Grande Vitesse (UGV) est constitué de différentes étapes telles que la génération de trajectoires, leur exécution et suivi sur machine outil, la coupe, etc. Les écarts ou approximations présents à chaque étape du processus sont sources de différences entre la géométrie initialement prévue, et celle qui peut être observée sur le produit fini. Ce papier s'intéresse plus particulièrement à l'étape de suivi de trajectoires lors de l'exécution du programme d'usinage correspondant sur centre UGV industriel. Les caractéristiques cinématiques des machines outils actuelles permettent d'atteindre des vitesses très élevées avec de fortes accélérations et décélérations. Le suivi de trajectoire peut alors être critique si les écarts de suivi sont importants, marquant ainsi la pièce. Les travaux présentés dans cette communication portent sur la modélisation du suivi réalisé par les asservissements de machine outil de type industriel, avec pour objectif d'évaluer la pertinence d'un modèle suffisamment simple et générique pour la prédiction des écarts géométriques sur la pièce usinée. Ainsi, à partir de ce modèle simple et convenant à tout type d'axe (translation ou rotation), nous présentons une démarche d'identification des différents paramètres. La pertinence du modèle complétée par des simulations du suivi des trajectoires et de la pièce usinée est ensuite évaluée par comparaison avec des essais expérimentaux sur centre UGV.*

**Mots clés : Usinage Grande Vitesse, Simulation, suivi de trajectoire, asservissements.**

### 1 Introduction

L'élaboration des pièces de formes complexes par usinage 5 axes à grande vitesse est un processus complexe, constitué de différentes étapes. La première étape porte sur l'obtention d'un modèle CAO de la pièce à réaliser. Ce modèle géométrique est basé sur les spécifications géométriques et fonctionnelles qui sont traduites à partir des intentions du designer. La deuxième étape consiste à créer un modèle FAO qui dans le cadre de l'usinage, est constitué principalement de trajectoires d'usinage. Enfin, la pièce est réalisée au cours de la troisième étape par l'exécution des trajectoires d'usinage précédemment calculées. Le grand nombre de paramètres intervenant dans chacune de ces étapes ainsi que les échanges d'informations entre activités constituent des difficultés et des limites pour la maîtrise du processus global afin de respecter les critères de productivité et de qualité du produit fini.

Ainsi, l'étape d'exécution de trajectoires 5 axes est composée d'un ensemble de traitements et de transformations de données permettant à partir d'un programme d'usinage d'obtenir le mouvement relatif entre la pièce et l'outil. Pour mieux appréhender ces transformations, il est possible de décomposer les différents traitements, suivant l'architecture utilisée dans les centres d'usinages industriels pour l'analyser étape par étape. Cette décomposition peut être présentée sur quatre niveaux, comme décrits sur la Figure 1 [1]. Le niveau 1 correspond au Directeur de Commande Numérique ou « contrôleur » qui traite les informations numériques d'un programme d'usinage en temps réel pour

élaborer les consignes de commande des différents axes. Le niveau 2 correspond aux cartes d'axes et aux variateurs, qui réalisent, après conversion des données numériques en données analogiques, le pilotage des axes. Le niveau 3 regroupe l'ensemble de la chaîne mécanique qui réalise la composition des mouvements d'axe afin de créer le mouvement relatif entre la pièce et l'outil. Le niveau 4 comprend la broche, l'outil et la pièce et rassemble les procédés de coupe et les phénomènes physiques associés. Les passages d'un niveau à un autre ainsi que les actions effectuées à chaque étage de cette architecture peuvent engendrer des erreurs et des écarts qui impactent la géométrie et l'état de surface finaux de la pièce. Par exemple, l'exécution des trajectoires réalisée par la CN regroupant l'interpolation et la résolution de la transformation géométrique inverse (TGI) sont sources d'erreurs pour la génération des consignes de position des axes ; le pilotage des axes et le suivi de trajectoires décrits par la cinématique et l'asservissement, dont les performances et la qualité jouent directement sur la géométrie de la pièce ; de même, les phénomènes thermiques, les phénomènes dynamiques vibratoires dus aux actions mécaniques de coupe, ou encore les déformations de la structure de la machine, celle de l'outil et/ou de la pièce, influent également sur les écarts géométriques et la qualité de la pièce usinée [2].

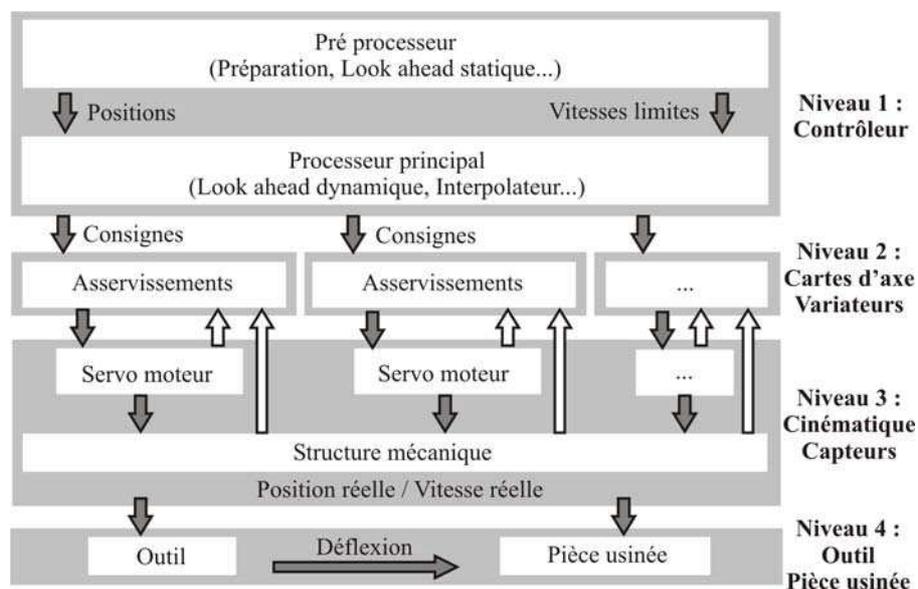


Figure 1. Architecture globale d'une MOCN

Au cours de travaux précédemment menés au laboratoire, un premier modèle d'exécution de trajectoires incluant le calcul des consignes de déplacement réalisé par le DCN, ainsi que des effets liés au suivi de l'axe par les asservissements a été établi [3]. Ce modèle consiste à identifier puis à évaluer les contraintes cinématiques des centres UGV et à les intégrer dans le calcul des consignes de position des axes délivrées par l'interpolateur. Il permet ainsi d'évaluer à partir d'une trajectoire d'usinage le suivi réel de l'outil, tant au niveau cinématique de chaque axe (position, vitesse, accélération et jerk) que du déplacement relatif outil/pièce. Une estimation des écarts géométriques au niveau de la pièce peut alors être obtenue par simulation. Cependant, afin d'obtenir une meilleure précision des simulations vis à vis du comportement réel, une modélisation distincte de l'interpolateur (niveau 1) de celle du suivi des axes réalisée par les asservissements (niveau 2) est nécessaire.

Ainsi, les travaux présentés dans cette communication s'attachent à modéliser le suivi des consignes de déplacement des axes afin d'évaluer les défauts géométriques engendrés sur les pièces. Pour parvenir à cet objectif, les résultats de simulation doivent être suffisamment précis pour quantifier les écarts introduits lors de cette étape et les comparer aux autres écarts intervenant dans le processus. Le modèle d'axe proposé doit être suffisamment général structurellement pour être appliqué à tout centre UGV, aussi bien pour les axes de translation que pour les axes de rotation.

Le document est organisé comme suit. Dans la partie 2, après avoir présenté le principe

d'asservissement d'un axe de machine outil industrielle, le modèle proposé ainsi que sa structure sont détaillés. La partie 3 se focalise sur la démarche et les méthodes mises en œuvre pour l'identification des paramètres associées à ce modèle d'axe. Les essais permettant de caractériser les performances du modèle en validant sa fidélité par rapport à la réalité sont présentés dans la 4<sup>ème</sup> partie. Enfin, la partie 5 présente un cas d'étude illustrant les défauts visibles sur la pièce causés par les écarts de suivi. La simulation de la pièce usinée y est confrontée aux résultats de la mesure de la pièce usinée sur centre UGV. Une conclusion et quelques perspectives permettent de conclure quant à l'intérêt d'un tel modèle autant pour la maîtrise du processus d'exécution de trajectoires, que pour son aspect générique.

## 2 Modélisation du suivi de trajectoire par les asservissements

### 2.1 Principe d'asservissement d'un axe de machine outil

La structure d'asservissement implantée dans les centres d'usinage industriels est une structure de commande classique, dite « cascade », composée de plusieurs boucles imbriquées de dynamique croissante. La structure de la commande d'un axe peut être représentée de manière simplifiée sur la Figure 2. La boucle la plus interne, de courant, est formée par la partie électrique du convertisseur de puissance et du moteur. Elle comporte généralement un correcteur de type proportionnel intégral (P.I.) ; sa dynamique est élevée par rapport aux autres phénomènes intervenant dans le système, réduisant de ce fait les effets des perturbations pouvant intervenir sur cette boucle. La boucle de vitesse, d'une dynamique un peu moins élevée incorpore également un correcteur de type P.I. Enfin la boucle de position, dont la période d'échantillonnage correspond à celle de tous les autres traitements, inclut souvent un régulateur de position de type gain proportionnel. Pour compenser des erreurs de traînage, des boucles d'anticipation en vitesse et en accélération sont greffées à la structure originelle en cascade.

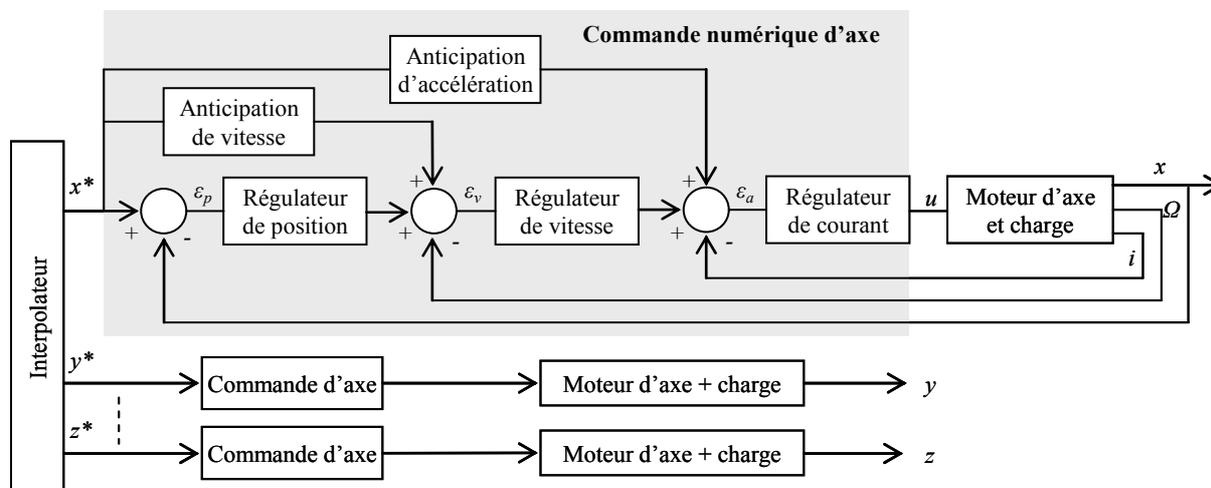


Figure 2. Commande numérique des axes

Bien que de nouvelles structures ou de nouveaux principes d'asservissements aient été développés dans la communauté scientifique et robotique, les structures implantées dans les CN des centres UGV restent à ce jour classiques et sont très fermées essentiellement pour des raisons historiques et de robustesse.

### 2.1 Détails de la modélisation

La modélisation du suivi de trajectoire établie repose sur la structure d'asservissement présentée en Figure 2. La présentation effectuée dans la suite du document concerne l'axe X, axe de translation. Une modélisation semblable (seule la chaîne de transformation de mouvement est différente) est réalisée pour les axes de rotation.

En regard de la Figure 1, ce sont les niveaux 2 et 3 qui sont considérés : les entrées du modèle sont donc les consignes calculées par l'interpolateur et délivrées aux cartes d'axe. Pour notre modèle, ces entrées sont au nombre de deux par axe : la Consigne de Position en Entrée de Régulateur (CPER) et la Consigne de Vitesse en Entrée de Régulateur (CVER). Le choix de ces deux consignes en entrée du « régulateur » est adopté car il permet de s'affranchir de traitements numériques spécifiques à chaque constructeur, effectués sur les consignes de position issues de l'interpolation [5]. La sortie principale du modèle est la position réelle de l'axe (PR) ; il est également possible d'extraire de ce modèle un ensemble d'informations telles que la cinématique ou le courant du moteur, etc. La schématisation de l'implantation de ce modèle sous Matlab® Simulink est présentée en annexe. Pour remonter au déplacement de l'outil par rapport à la pièce en ne tenant compte que des écarts liés au suivi, il ne reste plus qu'à utiliser un modèle de transformation géométrique direct idéal utilisant les positions réelles simulées pour chaque axe.

Afin de conserver un modèle suffisamment simple et générique, un nombre limité de phénomènes physiques et de traitements est volontairement pris en compte. Suivant la fidélité des simulations obtenues vis à vis du comportement réel, il pourra être envisagé d'intégrer de nouveaux éléments. Ainsi, le couplage entre axes ne sera pas pris en compte dans cette étude. Il existe néanmoins dans la littérature des modèles de couplage d'axes qui permettent de prendre en compte dans le suivi de trajectoire les effets dynamiques dus aux mouvements simultanés des axes. Des tels modèles semblent nécessaires pour des machines outils agiles [6] ou des robots de soudage par exemple [7]. La modélisation mise en place s'appuie sur l'hypothèse de mouvements de solides rigides, et de liaisons parfaites. Le comportement dynamique des composants de la machine outil (vibrations, raideurs de liaisons, jeux...) ainsi que les différentes compensations et filtres sont également négligés à cette étape de la modélisation [8], [9], [10], [11]. Enfin, les boucles anticipatrices en vitesse et en accélération peuvent être connectées ou non suivant le réglage voulu de la machine. A partir de ces hypothèses, les paramètres du modèle associés aux anticipations, aux frottements, au moteur et aux inerties doivent être identifiés avant de procéder aux simulations. La partie 3 présente la démarche mise en œuvre pour mener à bien cette étape sur centre UGV.

### 3 Identification des paramètres du modèle

#### 3.1 Technique d'identification

Il existe différentes techniques d'identification présentées dans la littérature. Certaines méthodes permettent de faire de l'analyse fréquentielle en déconnectant les boucles retour des asservissements. Ces techniques sont faciles à mettre en œuvre sur des machines outils à architecture ouverte [12], [13] où l'on peut aisément extraire tous les signaux dans la structure des boucles d'asservissement. D'autres méthodes plus globales modélisent le suivi par une fonction de transfert dont on vient identifier chacun des coefficients (pôles, gains, zéros) par l'exécution d'une trajectoire [14]. Cependant, ces méthodes ne peuvent pas s'appliquer de manière simple à des centres d'usinage industriels qui sont relativement fermés. Etant donné le faible nombre de signaux accessibles, ils doivent être mesurés soit par un appareillage externe souvent difficile à mettre en œuvre pour tout axe, soit en utilisant des fonctionnalités des CN récentes permettant d'enregistrer durant l'exécution d'un trajet quelques signaux comme le courant moteur, la position mesurée, la consigne d'accélération, etc. C'est cette dernière méthode non intrusive qui est retenue pour déterminer les paramètres de chacun des blocs de l'annexe que sont l'inertie équivalente rapportée sur l'arbre moteur, les modèles de loi de frottement, les fonctions d'anticipation et les blocs de recalage.

Les paragraphes qui suivent détaillent l'identification du frottement et de l'inertie équivalente en utilisant différents signaux comme l'intensité circulant dans le moteur, la position réelle et la vitesse mesurée sur les axes (notés respectivement ICC, PR et VR). Les termes intervenant dans les deux chaînes d'anticipation sont identifiés à partir des signaux de consigne anticipatrice de vitesse (CAV) et de consigne anticipatrice de couple (CAC).

### 3.2 Modélisation du frottement

Différents modèles de frottements présents dans littérature établissent une relation entre les frottements, la position d'un mobile, sa vitesse, la température, etc. [15], [16]. Nous choisissons pour notre application de mettre en œuvre un modèle de frottement dépendant uniquement de la vitesse de déplacement de l'axe comme le suggèrent [16], [17]. Les frottements seront donc la superposition de frottements visqueux et de frottements secs de type Coulomb. La pertinence de ce modèle sera validée par la mesure effectuée lors de l'identification. Détaillons maintenant la démarche d'identification.

Le théorème du moment dynamique appliqué à l'ensemble en projection sur l'axe de l'arbre moteur donne l'équation suivante :

$$C_m - C_r = J_{eq} \cdot \frac{d\Omega_m}{dt} \quad (1)$$

où  $C_m$  représente le couple moteur,  $C_r$  le couple résistants,  $J_{eq}$  l'inertie équivalente ramenée sur l'arbre moteur et  $\Omega_m$  la vitesse de rotation du moteur. Pour une accélération nulle (déplacement à vitesse constante), le couple résistant représentant l'ensemble des pertes, dissipations ou frottements dans la chaîne cinématique est égal au couple moteur. En utilisant un modèle de moteur à courant continu, où  $K_t$  est la constante de couple du moteur,  $i$  le courant débité dans le moteur et  $V$  la vitesse de déplacement de l'axe, on aboutit à la relation :

$$C_r(V) = K_t \cdot i \quad (2)$$

Il est possible de déterminer un modèle numérique de loi de frottements par des mesures successives de courant moteur pour des déplacements à différentes vitesses (Figure 3). Une courbe de tendance d'allure exponentielle définie par morceaux permet alors de modéliser le comportement réel avec suffisamment de précision (a, b, c, d et g sont les constantes déterminées) :

$$\begin{cases} C_r(V) = a \cdot e^{b \cdot V} + c \cdot e^{d \cdot V} & \text{pour } V > V_0 \\ C_r(V) = g \cdot V & \text{pour } -V_0 \leq V \leq V_0 \\ C_r(V) = -a \cdot e^{-b \cdot V} - c \cdot e^{-d \cdot V} & \text{pour } V < -V_0 \end{cases} \quad (3)$$

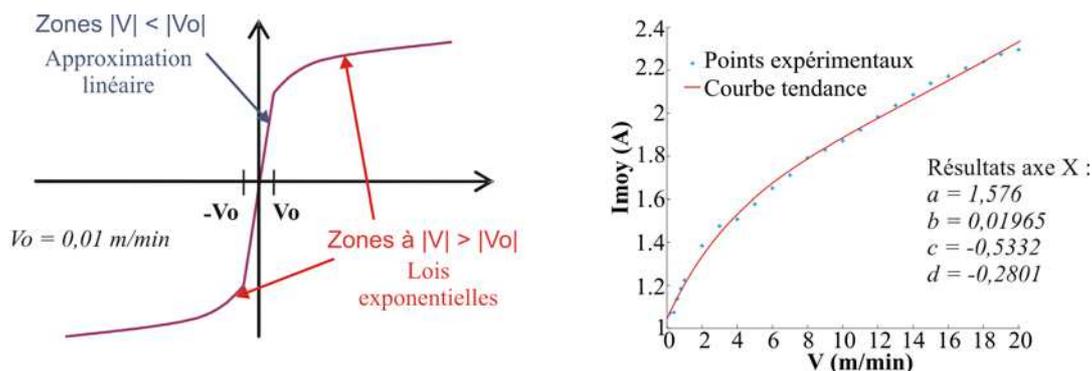


Figure 3. Modèle de loi de frottement et résultats de mesure

### 3.3 Détermination de l'inertie équivalente

Si les paramètres électriques du moteur peuvent être récupérés dans les documentations du constructeur ou dans les variables de la commande numérique, les paramètres concernant la partie mécanique qui se résument aux masses embarquées et autres inerties nécessitent également la mise en place d'une méthode expérimentale d'identification. Une inertie équivalente  $J_{eq}$  est alors calculée. Pour des phases de déplacement à accélération constante, l'équation (1) se transforme en :

$$J_{eq} = \frac{K_t \cdot i - C_r}{\frac{d\Omega_m}{dt}} \quad (4)$$

La démarche d'identification consiste alors à enregistrer les valeurs des signaux d'intensité et de vitesse réelle qui sont disponibles dans la CN lors de phases de déplacement à accélération non nulle.

### 3.4 Chaînes d'anticipation et paramètres de recalage

Les chaînes d'anticipation sont des techniques employées pour annuler les écarts de traînage sur la position [18]. Deux types d'anticipations sont modélisées : l'anticipation de vitesse et l'anticipation en accélération ou couple. Ces anticipations peuvent être désactivées, utilisées séparément ou simultanément. Les consignes anticipatrices sont généralement proportionnelles aux consignes de vitesse et d'accélération en entrée du régulateur. Ainsi, si la mesure des consignes anticipatrices est possible, il est assez simple de déterminer les valeurs des deux constantes.

Enfin, un même paramètre de recalage est positionné sur chacune des boucles anticipatrices ainsi que sur la boucle de position. Ce paramètre, défini comme étant un retard pur, permet de prendre en compte divers phénomènes physiques intervenant et des traitements numériques non connus, difficiles à évaluer et à modéliser. Le recalage est effectué par la mesure de la position simulée pour une trajectoire quelconque sollicitant l'axe.

## 4 Validation du modèle

Afin de valider le modèle de suivi de trajectoire, des comparaisons entre simulations et mesures de la position réelle du trajet outil sont réalisées sur un centre d'usinage 5 axes UGV Mikron UCP 710 (machine de type RRTT) équipée d'une commande numérique Sinumerik 840D de Siemens. Des trajectoires de différents types sont testées : des segments de droite ne sollicitant qu'un seul axe à la fois, puis des trajectoires 2 axes comportant des coins à angles droits et enfin une trajectoire 3 axes décrite sous format B-Spline. Les comparaisons sont menées au niveau de l'intensité débitée dans le moteur, de la vitesse réelle des axes et de leurs positions réelles.

### 4.1 Essais axe par axe

Ces essais en déplacement mono axe permettent de valider de manière indépendante chaque axe, sans a priori générer de couplage d'axes lors de l'exécution sur le centre d'usinage. Les résultats présentés dans ce paragraphe concernent l'axe de translation X avec et sans anticipation. Les résultats obtenus sur les autres axes de translation Y et Z sont semblables et ne seront donc pas présentés. Pour chaque axe, trois types d'essais sont effectués : le parcours d'un segment simple dans un seul sens pour une vitesse d'avance programmée de 15 m/min ; le parcours d'une trajectoire composée de deux segments présentant un fort ralentissement sur le second (vitesse programmée passant de 16 m/min à 6 m/min) ; et enfin un aller-retour sur un segment à une vitesse programmée de 15 m/min. Les résultats de la mesure et de la simulation sont présentés pour le premier essai sur la Figure 4. Les valeurs simulées sont très proches de celles relevées par l'intermédiaire des règles de mesure. La différence entre la position réelle mesurée et la position simulée oscille autour de 0 µm avec un écart allant jusqu'à 2 µm sur les zones de déplacement à accélération réduite et avec un écart localisé de 6 µm dans les phases critiques d'accélération et de décélération. Les mêmes résultats sont observés avec et sans anticipation et sur les deux autres types d'essais. Les valeurs simulées pour la vitesse de l'axe et pour le courant sont quasiment confondues avec les mesures.

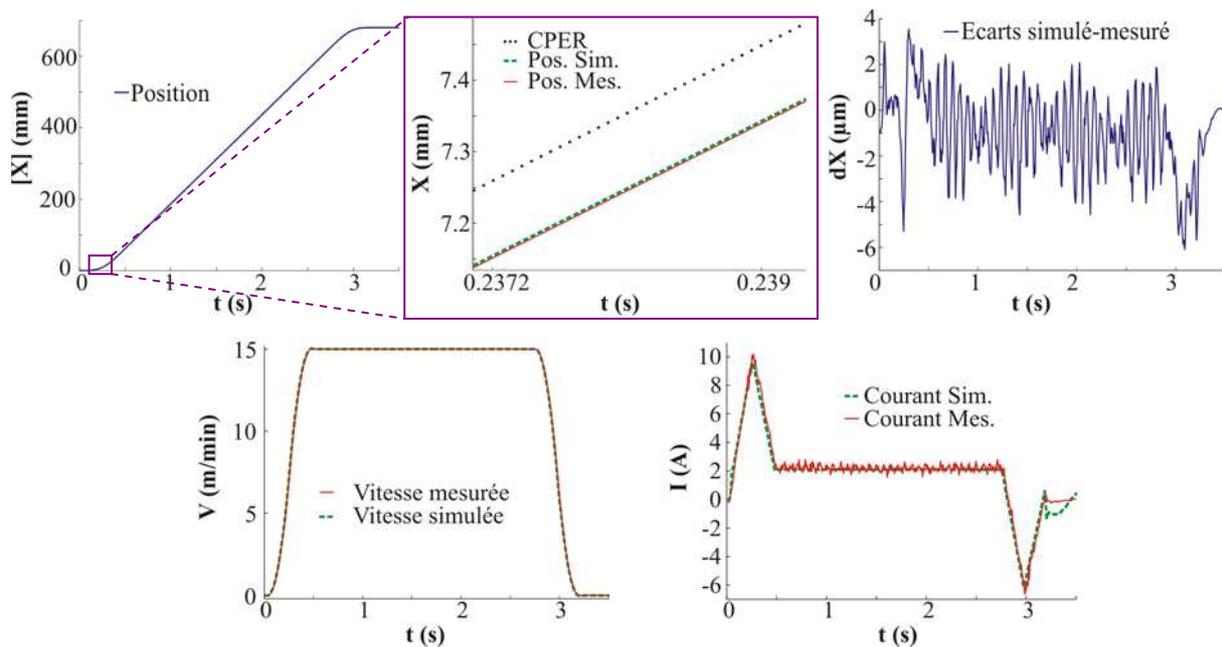


Figure 4. Essai de translation simple sur l'axe X

La Figure 5 reprend l'essai à deux vitesses d'avance programmées, pour l'axe C (celui sur l'axe A étant semblable), qui consiste comme pour les axes de translation à balayer un intervalle angulaire de 0 à 130° à 18 tr/min, puis à 6 tr/min de 130 à 210°. Les écarts relevés entre les positions angulaires simulées et mesurées sont inférieurs à 8 milli degrés sur cet axe.

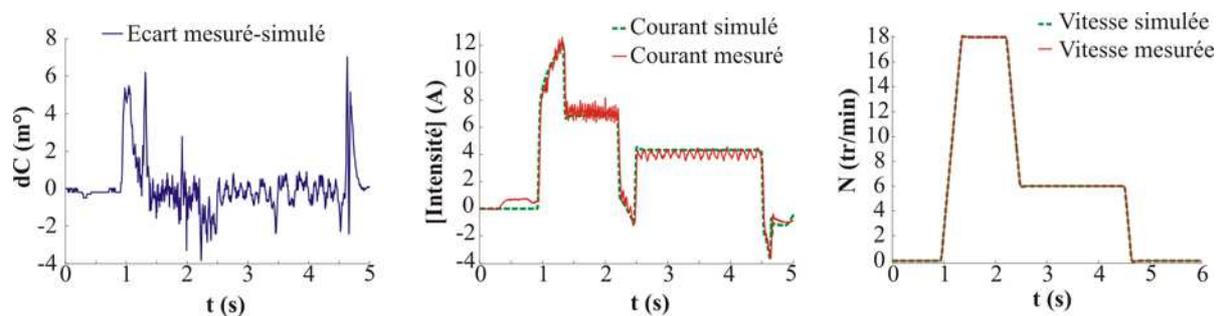


Figure 5. Essai de type aller retour sur l'axe C

Partant de ces premiers résultats, les différences entre simulation et mesure sont suffisamment faibles pour valider le modèle de suivi de trajectoire de chaque axe sollicité indépendamment. La précision de la simulation, dans ce cas inférieure au centième de millimètre semble suffisante pour prédire un état géométrique de pièce pour des écarts de suivi. Des constatations identiques peuvent être formulées pour l'autre axe de rotation A.

#### 4.2 Essais 2 axes

L'objectif de ces essais est de valider le modèle sur une trajectoire sollicitant 2 axes et présentant de grands ralentissements que l'on peut retrouver sur diverses applications telle que l'usinage de poches dans le domaine de l'aéronautique. Dans ce type de zones présentant des discontinuités en tangence, avec angles vifs, les écarts de suivi peuvent être localement importants.

Les résultats des essais pour deux trajectoires du plan XY sont présentés en Figure 6. La vitesse d'avance programmée est de 15 m/min. L'écart de suivi entre la consigne à l'entrée du régulateur et la position réelle du trajet varie de 0,05 mm à 0,2 mm. L'apport des fonctions d'anticipation est largement visible sur les relevés : les écarts à la consigne passant de 0,2 mm avec anticipations

désactivées (FFWOF) à 0,05 mm avec anticipations activées (FFWON). Les écarts maxima entre les trajets réels et les trajets simulés sont de 5 à 8  $\mu\text{m}$  dans les zones critiques d'accélération et de décélération ; ils sont inférieurs ailleurs. Les valeurs de vitesses, intensités simulées concordent avec les valeurs mesurées.

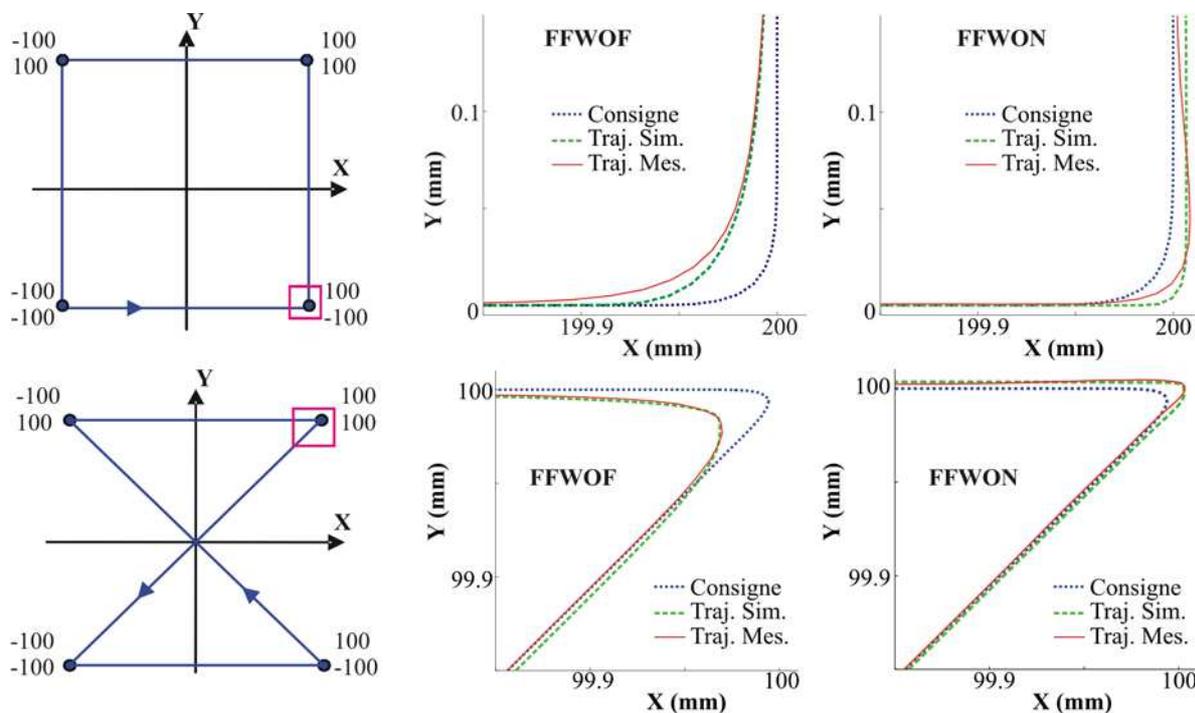


Figure 6. Essais de passages de coins dans le plan XY

Ces comparaisons montrent qu'il est possible de prédire les défauts géométriques engendrés sur la pièce lors du suivi de la trajectoire avec le modèle proposé

### 4.3 Essais trois axes

Dans cet essai, la trajectoire est décrite sous forme d'une courbe BSpline. La définition de cette courbe représentée Figure 7, est réalisée par son polynôme caractéristique, son degré et sa séquence nodale. La trajectoire est ensuite échantillonnée sous forme de segments pour être communiquée à la CN. La vitesse d'avance programmée est de 12 m/min. Les écarts entre la simulation et la mesure pour chaque axe lors de cet essai restent en général en dessous de 5 $\mu\text{m}$  avec localement des écarts d'environ 10 $\mu\text{m}$  pour l'axe Y et près de 15 $\mu\text{m}$  pour l'axe X avec dans chacun des cas les anticipations activées. Ces écarts peuvent être dues à des vibrations qui sont perceptibles pendant certaines phases d'accélération et de décélération, lors de l'exécution de la trajectoire. D'après les relevés, les écarts de suivi sont bien représentés par la simulation sur les différents axes.

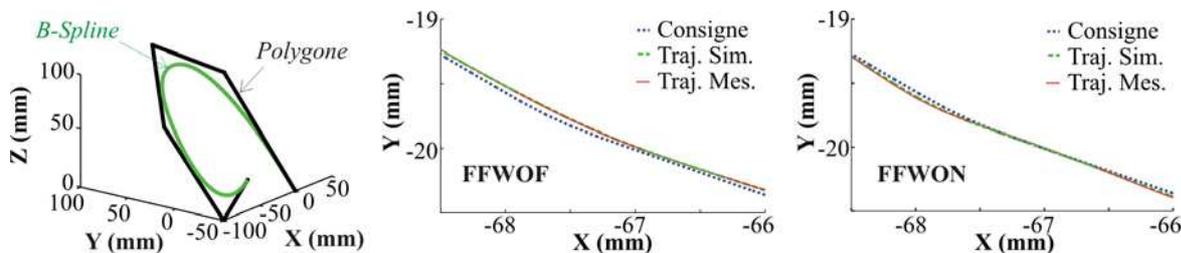


Figure 7. Essai sur courbe BSpline de type « 3 axes »

Au travers des différents essais mis en œuvre, nous pouvons constater que la simulation de la position réelle des axes, dont l'objectif est de prédire les écarts de suivi de trajectoire est satisfaisante.

Même si très localement les écarts de simulation par rapport aux trajets réels sont du même ordre de grandeur que ce que l'on souhaite estimer, les allures des trajectoires simulées sont fidèles au trajet réel. Les valeurs d'écart de suivi simulées donne une image représentative des écarts de suivi réels. Pour améliorer la précision des simulations, il serait maintenant nécessaire de raffiner le modèle proposé. Ainsi, le couplage dynamique des axes et les compensation des positions à l'inversion de déplacement sont les premiers éléments qu'il serait nécessaire d'implémenter. Enfin, notons qu'une simulation précise du suivi ne pourrait être effective que si les divers traitements logiciels et numériques propres à chaque système sont connus. Une telle modélisation ne peut donc être envisagée que dans le cadre de système à architecture ouverte.

Pour compléter l'étude, nous proposons maintenant d'appliquer le modèle de suivi développé à l'usinage d'une pièce afin de mettre en avant l'intérêt d'un tel outil pour la prédiction de la géométrie réelle des pièces usinée.

## 5 Application à l'usinage d'une pièce

L'objectif de cette partie est de constater l'influence du suivi des axes sur la qualité géométrique d'une pièce. L'application repose sur l'usinage d'une matrice de forge, présentée en Figure 8. Cette pièce présente des discontinuités géométriques entre les différentes parois, ce qui entraîne de forts ralentissements au passage de ces discontinuités. Une pièce test de taille réduite est créée en ne considérant qu'une partie de la géométrie de la matrice.

### 5.1 Mise en oeuvre

L'orientation de la pièce test est telle que la trajectoire d'usinage est constituée de segments de droites dans le plan XZ. Un premier usinage de la pièce est réalisé avec des conditions opératoires permettant de réduire au maximum les écarts de suivi : surépaisseur pour la finition très faible de 0,1 mm pour limiter les actions mécaniques et flexions outils, vitesse d'avance très faible de 0,1 m/min pour réduire les écarts de suivi. L'usinage est réalisé en plans parallèles avec une hauteur de crête de 1,5  $\mu\text{m}$  avec un outil boule de diamètre 10 mm. La surface ainsi obtenue constitue la surface de référence considérée comme parfaite. Au centre de cette surface, une portion de trajectoire contenue dans un plan est re exécutée avec une vitesse d'avance programmée de 10,5 m/min. Les écarts de suivi attendus marquent la surface de référence précédemment usinée. Cette marque peut être observée à l'œil sur la photo de la Figure 8.

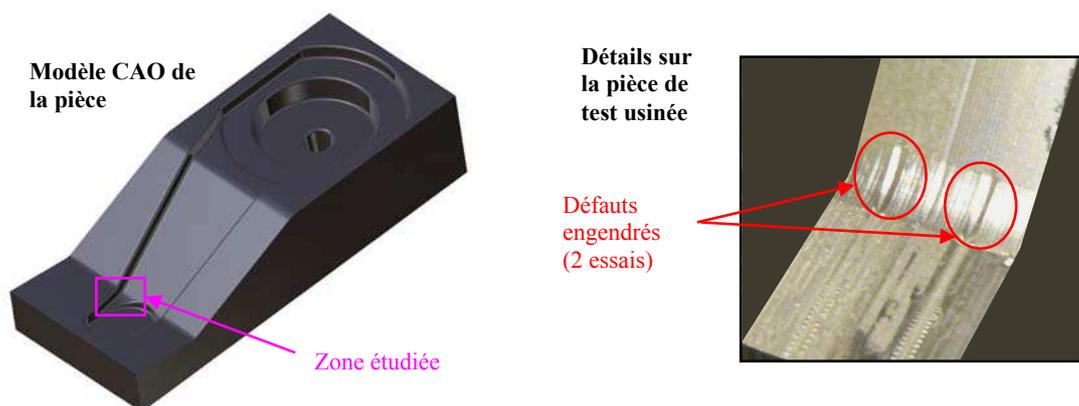


Figure 8. Pièce test

Afin de quantifier l'influence réelle du suivi sur la pièce usinée, la pièce est mesurée par microscopie confocale à champ étendu. Le résultat de la mesure est fourni sur la Figure 9. Un écart maximal à la trajectoire dite de référence est alors déterminé au fond de la calotte laissée par le passage de l'outil. Cet écart maximal de 0,02 mm correspond à la projection selon la direction de mesure de la valeur obtenue par simulation du suivi.

## 5.2 Simulation de la géométrie de la pièce

Le modèle de suivi de trajectoire précédemment établi pour chacun des axes est maintenant utilisé pour prédire la géométrie finale de la pièce test. Les différentes consignes de position et de vitesse en entrée de régulateur (à basse et haute vitesse d'avance) sont récupérées pendant l'exécution de la trajectoire sur la machine. Ces relevés sont ensuite traités par le modèle pour simuler la position réelle des axes ; une fois cette étape réalisée, les résultats de simulation sont donnés en entrée d'un simulateur d'enlèvement de matière de type N-Buffer développé au laboratoire [19]. Les résultats de la prédiction des écarts géométriques sur la pièce sont donnés sur la Figure 9. Nous pouvons constater que les résultats obtenus par simulation sont proches des mesures. La géométrie de la marque engendrée sur la pièce est bien représentée ; la prédiction de l'écart maximal est de 0,027 mm pour 0,02 mm dans le cadre de la mesure par microscopie confocale sur la pièce physique. D'après les relevés effectués, le repositionnement de l'axe lors de l'usinage à vitesse élevée est différent de celui obtenu à vitesse lente. Cet écart de position est lié à la fois à la génération des consignes de position par l'interpolateur et à la tolérance de suivi définie dans la CN. Le modèle présenté concerne uniquement le suivi de la trajectoire et n'intègre pas l'étape amont d'interpolation ; ainsi l'influence de la vitesse programmée sur les consignes de position générées n'est pas prédite. C'est pourquoi l'écart géométrique au niveau de la pièce visible dans la partie inférieure n'apparaît pas en simulation. De même, d'autres phénomènes tels que la coupe, les sollicitations dynamiques de la structure de la machine ou encore la géométrie réelle de l'outil et des axes ne sont pas modélisés et interviennent dans l'usinage réalisé. Leur prise en compte semble nécessaire pour atteindre un meilleur degré de précision des simulations. Cet essai permet cependant de valider l'intérêt de l'utilisation d'un tel modèle de suivi de trajectoire pour la prédiction des écarts géométriques sur la pièce.

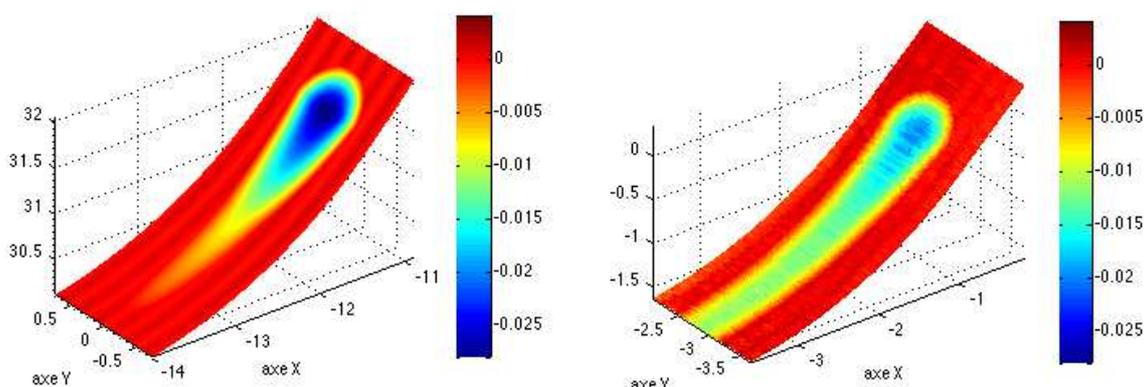


Figure 9. Ecart géométriques simulés et mesurés sur la pièce test

## 6 Conclusion et perspectives

Le processus d'élaboration de pièces de formes complexes en UGV, comporte de nombreuses difficultés affectant la qualité géométrique des pièces usinées. L'objectif global des travaux consiste à prédire l'état géométrique final de la pièce. Cette prédiction nécessite donc un modèle pour chaque étape du processus. Les travaux présentés portent sur la modélisation du suivi de la trajectoire et des conséquences géométriques sur la pièce usinée. Pour cela, un modèle d'asservissement d'axe de machine-outil industrielle relativement simple et générique a été présenté. Basé sur une structure de type cascade comportant des boucles d'anticipation, une démarche d'identification rapide des paramètres de ce modèle est présentée. La validation de ce modèle a ensuite été effectuée sur un centre UGV Mikron UCP 710, permettant ainsi de vérifier le comportement prévu par rapport au réel. Afin d'améliorer la précision des prédictions des positions réelles des axes, il apparaît nécessaire de prendre en compte des éléments spécifiques tels que le couplage d'axes et certains traitements numériques influents. Enfin, associé à un modèle d'enlèvement matière, nous avons montré l'intérêt de la simulation du suivi des trajets. Les écarts géométriques prévus au niveau de la pièce représentent assez

fidèlement la pièce réelle, notamment par la forme prédite sur la surface. La géométrie réelle de la machine, celle de l'outil et les défauts liés à la coupe semblent également intervenir lors de l'opération réalisée. Ce sont autant d'autres étapes du processus qu'il faut considérer pour aboutir à une simulation précise du processus complet.

## 7 Remerciements

Ces travaux ont été menés au sein du groupe de travail « Manufacturing 21 », regroupant 18 laboratoires de recherche français.

Les thèmes abordés sont :

- la modélisation du processus de fabrication,
- le « virtual machining »,
- l'étude des procédés de fabrication émergents.

## 8 Bibliographie

- [1] A. DUGAS, « Simulation d'usinages de formes complexes », Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, Université de Nantes, 2002.
- [2] T. L. SCHMITZ, J. C. ZIEGERT, J. S. CANNING, R. ZAPATA, « Case study : A comparison of error sources in high-speed milling », *Precision Engineering*, Vol. N° 32, pp. 126-133, 2008.
- [3] S. LAVERNHE, « Prise en compte des contraintes associés au couple MO-CN en génération de trajectoire 5 axes UGV », Thèse de doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2006.
- [4] S. LAVERNHE, C. TOURNIER, C. LARTIGUE, « Optimization of 5-axis high-speed machining using a surface based approach », *Computer Aided Design*, Vol. N° 40, pp. 1015-1023, 2008.
- [5] S. BLOCH, E. DENEUVILLE, L. TAN, « Innovative feed rate optimisation technique », 3<sup>e</sup> congrès international sur la coupe des métaux et l'usinage à grande vitesse, 2001.
- [6] P.-J. BARRE, « Modélisation du comportement dynamique et commande d'une machine-outil agile », *Mécanique & Industries*, vol. 3, 2002.
- [7] R. RAMESH, M.A. MANNAN, A.N. POO, « Tracking and contour error control in CNC servo systems », *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 45, pp. 301-326, 2005.
- [8] SIEMENS, Description de fonctions – Sinumerik 840D/840Di/810D, [www.automation.siemens.com/doconweb](http://www.automation.siemens.com/doconweb), 2002.
- [9] P.-J. BARRE, « Commande et entraînement des machines-outils à dynamique élevée – Formalismes et applications », Habilitation à diriger des recherches, Université des Sciences et Technologie de Lille, 2004.
- [10] C.-H. YEUNG, Y. ALTINTAS, K. ERKORKMAZ, « Virtual CNC system. Part I. System architecture », *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 46, pp.1107-1123, 2006.
- [11] R. WHALLEY, M. EBRAHIMI, A.A. ABDUL-AMEER, « Hybrid modelling of machine tool axis drives », *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 45, pp. 1560-1576, 2005.
- [12] C.-H. YEUNG, Y. ALTINTAS, K. ERKORKMAZ, « Virtual CNC system. Part II. System architecture », *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 46, Chap. 10, p. 1124-1138, 2006.
- [13] K. ERKORKMAZ, Y. ALTINTAS, « High speed CNC system design. Part II: modelling and identification of feed drives », *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 41, pp. 1487-1509, 2001.
- [14] K. ERKORKMAZ, W. WONG, « Rapid identification technique for virtual CNC drives ; *International Journal of Machine Tools and Manufacture* », Vol. 47, pp. 1381-1392, 2007.

- [15] R. KIKUUWE, N. TAKESUE, A. SANO, H. MOCHIYAMA, H. FUJIMOTO, « Fixed-step friction simulation : from classical Coulomb model to modern continuous models », Intelligent Robots and Systems (IROS 2005), IEEE/RSJ International Conference on, 2005.
- [16] H. OLSSON, K.J. ASTRÖM, C. CANUDAS DE WIT, M GÄFVERT, P. LISCHINSKY, « Friction models and friction compensation », Lund University, 1997.
- [17] K. MENON, K. KRISHNAMURTHY, « Control of low velocity friction and gear backlash in a machine tool feed drive system Mechatronics », Vol. 9, pp. 33-52, 1999.
- [18] P. LAMBRECHTS, M. BOERLAGE, M. STEINBUCH, « Trajectory planning and feedforward design for electromechanical motion systems », Control Engineering Practice, Vol. 13, pp. 145-447, 2005.
- [19] S. LAVERNHE, Y. QUINSAT, C. TOURNIER, C. LARTIGUE, R. MAYER, « NC-simulation for the prediction of surface finish in 5-axis High Speed Machining », Acte de : 3rd International Conference High Performance Cutting (HPC), Vol. N° 1, pp. 387-396, Dublin, Irlande, pp. 12-13, 2008.

Annexe

