



HAL
open science

Simulation du comportement dynamique d'un système usinant : modélisation de l'interaction outil/matière en présence d'une pièce flexible

Philippe Lorong, Gérard Coffignal, Stéphanie Cohen-Assouline

► To cite this version:

Philippe Lorong, Gérard Coffignal, Stéphanie Cohen-Assouline. Simulation du comportement dynamique d'un système usinant : modélisation de l'interaction outil/matière en présence d'une pièce flexible. 8e Colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2007, Giens, France. 10.1051/meca:2008015 . hal-01509260

HAL Id: hal-01509260

<https://hal.science/hal-01509260>

Submitted on 16 Apr 2017

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Simulation du comportement dynamique d'un système usinant : modélisation de l'interaction outil/matière en présence d'une pièce flexible

Philippe Lorong – Gérard Coffignal – Stéphanie Cohen-Assouline

*Laboratoire de Mécanique des Systèmes et des Procédés – UMR CNRS 8106
Ecole Nationale Supérieure d'arts et Métiers
151, boulevard de l'Hôpital, 75 013 Paris
Tel. : 01 44 24 62 85 / Fax : 01 44 24 64 68
{philippe.lorong, gerard.coffignal}@paris.ensam.fr*

RÉSUMÉ. La simulation du comportement dynamique d'un système usinant conduit à la résolution d'un problème de non-linéaire de vibrations où la modélisation de l'interaction outil/pièce joue un rôle central. Cette interaction a pour particularité d'évoluer au cours du temps suite à une modification régulière de la frontière du domaine pièce qui correspond à l'enlèvement progressif de matière. La flexibilité de la pièce complique très nettement son évaluation. Les différents modèles nécessaires à la simulation du comportement dynamique du système usinant sont présentés ainsi que la démarche adoptée pour modéliser l'interaction outil/pièce.

ABSTRACT. The simulation of a machining system leads to the resolution of a non-linear problem of vibrations where the modeling of the interaction tool-part plays a central part. This interaction has as a characteristic to evolve in the course of time following a regular modification of the domain boundary of the part which corresponds to the progressive removal of matter. The flexibility of the part complicates its evaluation very clearly. The various models necessary to the simulation of the dynamic behavior of the machining system are presented as well as the approach adopted to model the interaction tool/part.

MOTS-CLÉS: Usinage, Vibrations, Etat de surface, Simulation numérique, Procédé de fabrication
KEYWORDS: Machining, Surface quality, Vibrations, Numerical simulation, Manufacturing process

1. Introduction

La simulation du comportement dynamique d'un système usinant (système Pièce/Outil/Machine : système **POM**) conduit à la résolution d'un problème de dynamique non-linéaire où la modélisation de l'interaction outil/pièce joue un rôle central. Cette interaction qui est prescrite via la donnée d'une trajectoire théorique outil/pièce fixant le mouvement relatif des référentiels $\mathcal{R}_{\text{Outil}}$ par rapport au référentiel $\mathcal{R}_{\text{Pièce}}$, a pour particularité d'évoluer au cours du temps suite à une modification régulière de la surface usinée qui correspond à une partie de la frontière du domaine de la pièce.

La flexibilité de la pièce complique très nettement l'évaluation de l'interaction outil/pièce ainsi que le suivi de la frontière du domaine qu'elle occupe, à cause de ses vibrations qui ne peuvent pas être négligées. L'effet retard qui provient de l'histoire de l'enlèvement de matière peut de plus conduire à l'auto-excitation du système et être responsable du phénomène de broutement (Merritt, 1965). Ce phénomène de broutement, est fréquemment observé lors de l'usinage de pièces flexibles (carter, voiles minces). La simulation de son apparition doit être réalisée afin de l'éviter : c'est un des objectifs de la méthode que nous proposons.

Dans cet article, après avoir rapidement rappelé les différents modèles nécessaires à la simulation du comportement dynamique du système **POM**, nous précisons la démarche que nous avons adoptée pour modéliser l'interaction outil/pièce lorsque cette dernière est flexible, le schéma incrémental et les schémas itératifs mis en place. Cette démarche prend en compte les variations significatives de masse et de rigidité. Des exemples de simulations en tournage et en fraisage sont présentés avant une courte conclusion.

2. Modèles nécessaires

La prédiction des efforts de coupe, et du comportement dynamique du système **POM**, passent ainsi par l'utilisation d'un modèle géométrique de la pièce et de sa surface usinée qui évolue au cours de temps et d'un modèle éléments finis de la pièce et du reste du système **POM** (Cohen-Assouline, 2005).

Lorsque la pièce ne peut être considérée comme rigide, un **modèle éléments finis** vient compléter sa description mécanique. Ici la pièce est modélisée par des éléments plaque. Le reste du système **POM** ne pose pas de problème spécifique. Il est généralement modélisé de façon simplifiée. Nous notons *X les coordonnées du point courant dans les configurations de référence non déformées de l'outil et de la pièce avant bridage. Une discrétisation $U({}^*X, t) = N({}^*X).q(t)$ du champ de déplacement du système **POM** permet de mettre en place un système matriciel [1] en décrivant le mouvement par l'intermédiaire des paramètres cinématiques q .

$$0 = \psi = M(p)\ddot{q} + C(p, \omega)\dot{q} + K(p)q - Q_{\text{coupe}}(q, \dot{q}, \partial\Omega_{\text{coupe}}, t) \quad [1]$$

Les composantes $q_i(t)$ de la matrice colonne ${}^tq \equiv q(t)$ sont les inconnues du problème. Avec la mise en équations que nous adoptons, les matrices $M(p)$, $C(p, \omega)$

et $\mathbf{K}(\mathbf{p})$ sont respectivement les matrices de masse, d'amortissement (intégrant éventuellement un effet gyroscopique dépendant de la vitesse de rotation ω de la broche) et de rigidité construites en tenant compte de la géométrie donnée par \mathbf{p} .

Malgré l'enlèvement de matière, dans de nombreux cas les matrices de masse et de rigidité peuvent être considérées comme constantes sur un intervalle de temps très largement supérieur au pas de temps retenu dans le schéma incrémental de résolution. La résolution de [1] est obtenue en utilisant un schéma (implicite) de Newmark utilisant un pas de temps constant Δt (Coffignal *et al.*, 1997).

Le second membre \mathbf{Q}_{coupe} , qui provient des efforts de coupe, introduit un terme non linéaire dans [1]. Ceci conduit à la mise en place d'un schéma itératif de résolution sur chaque incrément de temps. \mathbf{Q}_{coupe} est obtenu à partir du modèle d'interaction outil/pièce utilisé. Pour cette étude il se base, d'une part sur la notion d'**outil effaceur de matière** : *là où les parties actives de l'outil passent la matière disparaît*, d'autre part sur une *loi de coupe* (dite "macroscopique") qui donne les efforts de coupe appliqués par l'outil sur la pièce, sous forme d'une densité linéique \mathbf{f}_{coupe} en fonction des conditions instantanées de coupe. La formulation éléments finis permet d'en déduire \mathbf{Q}_{coupe} à chaque instant et la position "d'équilibre" associée, qui est donnée par \mathbf{q} . Ce modèle d'interaction outil/pièce, relativement simple où les aspects thermomécaniques de la coupe ne sont pas explicitement pris en compte, permet néanmoins de générer une évolution réaliste de la surface usinée et des efforts de coupe (Jayarama *et al.*, 2001, Atabey *et al.*, 2003) à l'échelle considérée ici. Il est retenu de façon usuelle pour réaliser les études de stabilité de la coupe.

La prise en compte de pièces déformables impose une définition précise de l'effacement de matière (Cohen-Assouline, 2005) et nécessite de définir un espace matériel de référence ${}^r\mathbf{E}_3$ pour suivre de façon précise l'évolution de l'image ${}^r\Omega(t)$ du domaine. Dans ${}^r\mathbf{E}_3$, les images \mathbf{s} des points \mathbf{X} de la pièce, sont immobiles quelle que soit la configuration de la pièce. ${}^*\mathbf{X}$ désigne un point de la pièce dans sa configuration non bridée et fixée isostatiquement dans $\mathcal{R}_{pièce}$. La bijection de travail ${}^*\Phi : \mathbf{s} \mapsto {}^*\mathbf{X}$ retenue dans cette présentation est une isométrie. La condition initiale ${}^0\mathbf{q}$ est obtenue par une résolution statique associée au bridage et donne ${}^0\Phi$.

$${}^t\Phi : \mathbf{s} \mapsto {}^t\mathbf{X} = {}^*\mathbf{X} + {}^t\mathbf{U} = {}^*\mathbf{X} + \mathbf{N}({}^*\mathbf{X}).{}^t\mathbf{q} \quad \text{et} \quad {}^t\Phi^{-1} : {}^t\mathbf{X} \mapsto \mathbf{s} \quad [2]$$

Dans les approches à l'échelle macroscopique, les efforts de coupe sont modélisés via des densités linéiques \mathbf{f}_{coupe} définies le long des arêtes de coupe de l'outil (voir partie droite de la figure 1). Des modes de construction de modèles donnant les composantes de \mathbf{f}_{coupe} dans des repères liés aux faces de coupe sont disponibles (Bissey, 2005). Ces modèles font en général intervenir h_{coupe} , l'épaisseur locale instantanée de coupe et la vitesse relative locale outil/pièce. h_{coupe} est obtenue, pour chaque partie de face de coupe par des considérations géométriques, en partant du volume de matière enlevée et en effectuant une moyenne sur Δt . Ceci permet un lissage de l'évaluation de \mathbf{f}_{coupe} qui améliore la convergence.

La modélisation de l'enlèvement de matière et de l'interaction instantanée outil/pièce nécessitent de mettre en place des **modèles géométriques**, d'une part des domaines balayés par les faces de coupe pendant un pas de temps de calcul Δt , un modèle **BREP** \mathcal{M}_b par facettes triangulaires planes est retenu ici, d'autre part du domaine évolutif de la pièce. Ici, un modèle utilisant des **Dexels** (parallépipèdes rectangles jointifs de section carrée, associés à une grille et disposés suivant l'axe 3) dans ${}^r\mathbf{E}_3$ permettant de représenter ${}^r\Omega(t)$ à mesure que l'effacement de matière se produit est retenu. Ce dernier choix permet des traitements optimisés des algorithmes d'intersection. La nécessité de réaliser les intersections dans ${}^r\mathbf{E}_3$ impose par ailleurs de

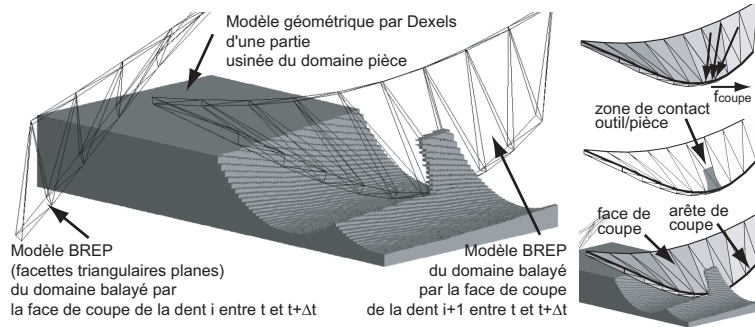


Figure 1. Modèles géométriques dans l'espace de référence matériel : Pièce (Dexels) et Domaine balayé par les faces de coupe des dents i et $i + 1$ d'une fraise hélicoïdale dans ${}^r\mathbf{E}_3$ (BREP).

transporter à chaque itération de chaque incrément les sommets des facettes de \mathcal{M}_b depuis l'espace réel \mathbf{E}_3 associé à $\mathcal{R}_{\text{pièce}}$. Pour les sommets appartenant au maillage de calcul c'est immédiat (mais itératif) via ${}^t\Phi^{-1}$. Pour les autres sommets il est nécessaire de construire une extension ${}^t\Phi^+$ de ${}^t\Phi$: ceci est réalisé via un maillage hexaédrique qui est défini de façon régulière à l'intérieur des éléments de plaque, et étendu dans un domaine parallélépipédique (rectangle) de très grande taille à l'extérieur. Une matrice de liaison $\mathbf{G}_{\text{calcul}}^{\text{hexa}}$ permet de réaliser un transfert approché du champ \mathbf{U} en fixant grâce à lui les déplacements \mathbf{q}_{hexa} des noeuds des hexaèdres définissant ${}^t\Phi^+$: $\mathbf{q}_{\text{hexa}} = \mathbf{G}_{\text{calcul}}^{\text{hexa}} \cdot \mathbf{q}$. Les déplacements des noeuds très éloignés sont fixés à 0.

3. Démarche adoptée

Lorsqu'elles ne sont pas négligeables, les conséquences des pertes de masse et de rigidité sont prises en compte de façon simplifiée en utilisant la connaissance a priori que l'on a de la trajectoire "théorique outil-pièce" et par suite de $\mathbf{p}(t)$. Ceci conduit à un schéma de résolution qui ne nécessite la mise à jour des matrices de rigidité et de masse qu'au passage de certains piquets de temps T_j définis à l'avance en utilisant une interpolation linéaire de l'inverse de l'opérateur de Newmark entre deux piquets. Les différents modèles éléments finis de la pièce associés à chaque piquet de temps retenu

pour les changements de matrices peuvent être construits et les matrices calculées et stockées avant le lancement de la simulation.

L'initialisation du processus de calcul comprend les étapes suivantes : lecture du modèle géométrique de l'outil défini dans $\mathcal{R}_{\text{Outil}}$, de celui de la pièce défini dans $\mathcal{R}_{\text{Pièce}}$, du maillage EF de la pièce défini dans $\mathcal{R}_{\text{Pièce}}$. Construction de l'opérateur $\mathbf{G}^{\text{hexa}}_{\text{calcul}}$. Lecture des conditions de liaison de la pièce dans $\mathcal{R}_{\text{Pièce}}$ (bridage), des modèles de calcul de f_{coupe} , des trajectoires imposées entre $\mathcal{R}_{\text{Outil}}$ et $\mathcal{R}_{\text{Pièce}}$.

Grandes lignes de la méthode

Début ; Initialisations et calcul (résolution statique) de 0q (bridage)

Pour (pour $t \in]t_0, t_{max}]$ (par pas Δt))

Si (t correspond à un piquet de temps T_j) **alors**

lire $M(p_j), C(p_j), K(p_j) \Rightarrow$ l'opérateur de Newmark ; **fin Si** ;

$t := t + \Delta t$; $d = \|{}^{t+\Delta t}\psi^{(0)}\| = \infty$; $i := 0$; déplacer outil et pièce (respect de la trajectoire imposée entre $\mathcal{R}_{\text{Outil}}$ et $\mathcal{R}_{\text{Pièce}}$ à $t + \Delta t$) ;

Tant que ($d \geq$ à tolérance retenue)

$i := i + 1$; en déduire une estimation de ${}^{t+\Delta t}q^{(i)}$;

réaliser les **intersections entre volume balayé et pièce** pendant $]t, t + \Delta t]$

(ramener le volume balayé par les faces de coupe dans l'espace matériel en utilisant $({}^t\Phi^+)^{-1}$ et $\mathbf{G}^{\text{hexa}}_{\text{calcul}} \Rightarrow$ estimation (i) des parties "effacées" et de ${}^r\Omega(t + \Delta t)^{(i)}$, nouveau domaine pièce ;

en déduire ${}^{t+\Delta t}Q_{\text{coupe}}^{(i)}$ puis le "déséquilibre" $d = {}^{t+\Delta t}\psi^{(i)}$; **fin Tant que** ;

mise à jour ${}^r\Omega(t + \Delta t) := {}^r\Omega(t + \Delta t)^{(i)}$ du domaine pièce ; **fin Pour** ; **Fin** ;

4. Exemples

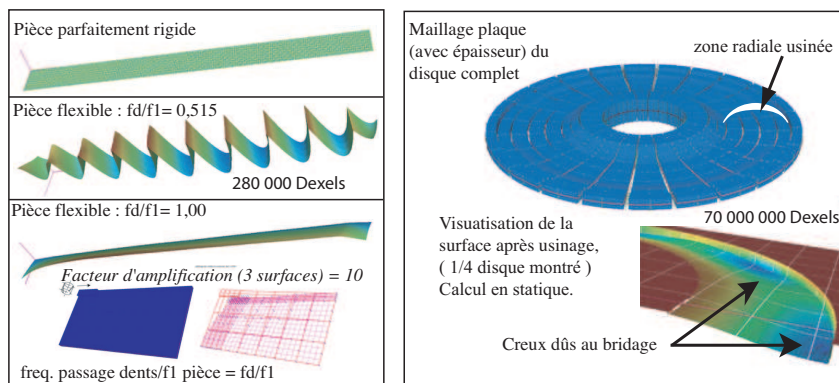


Figure 2. Surface finale simulée : à gauche fraiseage (dynamique transitoire, diverses vitesses de rotation), à droite tournage (calcul statique avec bridage)

L'exemple du fraiseage d'une portion d'une pièce mince permet de mettre en évidence les différences qui apparaissent sur la surface usinée finale en fonction du rap-

port $f_d/f_1 = \frac{\text{fréquence de passage des dents}}{\text{fréquence propre 1 de la pièce}}$. Noter que ces surfaces sont nécessaires et donc calculées, mises à jour et disponibles à chaque instant t_k du calcul : leur connaissance est indispensable pour chaque itération i effectuée à $t_{(k+1)} = t_k + \Delta t = t + \Delta t$ pour calculer les efforts ${}^{t+\Delta t}f_{coupe}^{(i)}$ puis ${}^{t+\Delta t}Q_{coupe}^{(i)}$.

L'exemple de tournage présenté ici est seulement destiné à illustrer les possibilités de l'approche proposée, en se limitant ici à une simulation en statique d'une pièce industrielle (SNECMA-SAFRAN). Le bridage déforme la pièce par rapport à sa forme initiale donnée par Φ au début de l'opération. Ceci est la principale cause des creux observés sur la surface usinée finale. Cette figure montre le découpage du modèle *Dexels* qui permet de traiter des modèles géométriques de taille quelconque.

5. Conclusion

La démarche présentée ici est actuellement implantée dans *Nessy* le logiciel développé au *LMS*. Les tests réalisés montrent la capacité de l'approche à traiter des pièces industrielles. Cependant de nombreux travaux sont encore à faire pour pouvoir mettre en place un logiciel métier et effectuer des validations sur des pièces complexes.

Remerciements

Nous tenons à remercier MM. C. Le Calvez, J-F. Chabot et A. Perez-Duarte (SNECMA-SAFRAN) pour leur soutien à cette étude qui nous a permis, en particulier, de vérifier les capacités de la méthode sur une pièce de grande taille en tournage.

6. Bibliographie

- Atabey F., Lazoglu I., Altintas Y., « Mechanics of boring processes – Part I », *Int. J. Machine Tools, and Manufacture*, vol. 43, n° 5, p. 463-476, 2003.
- Bissey S., Développement d'un modèle d'effort de coupe applicable à des familles d'outils : cas du fraisage des aciers traités thermiquement, PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Avril, 2005.
- Coffignal G., Beauchesne E., Dekelbab K., Hakem N., « Mechanical simulation of machining », in , P. Chedmail, , J. Bocquet, , D. Dornfeld (eds), *IDMME'97*, Kluwer Academic, p. 297-306, 1997.
- Cohen-Assouline S., Simulation numérique de l'usinage à l'échelle macroscopique : prise en compte d'une pièce déformable, PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Décembre, 2005.
- Jayarama S., Kapoor S., DeVor R. E., « Estimation of the specific cutting pressures for mechanistic cutting force models », *Int. J. Machine Tools, and Manufacture*, vol. 41, n° 2, p. 265-281, 2001.
- Merritt H. E., « Theory of self-excited machine tool chatter — Resarch I », *J. of Engineering for Industry*, vol. 17, p. 447-454, 1965.