

## Une nouvelle approche des conséquences thermomécaniques induites par les procédés d'usinage : application à la rectification et au tournage.

A. Brosse, F. Valiorgue, H. Hamdi, J. Rech, J-M. Bergheau

CNRS UMR 5513

LTDS ENISE/ECL

58 rue Jean Parot 42023 Saint-Étienne, France

[alexandre.brosse@enise.fr](mailto:alexandre.brosse@enise.fr)

### Résumé :

*Les sollicitations thermomécaniques locales et les changements métallurgiques sont les principaux phénomènes à l'origine de l'apparition des contraintes résiduelles induites par les opérations d'usinages. Les études réalisées dans ce domaine font intervenir des modèles éléments finis simulant la coupe. Ceux ci sont très difficiles à mettre en oeuvre du fait des incertitudes des coefficients de frottement interfaciaux, des modèles d'endommagement et de l'ensemble des paramètres numériques. La méthode présentée dans cet article permet de s'affranchir de la simulation de l'enlèvement de matière et a pour but de simuler les contraintes résiduelles dans la profondeur de la pièce en fonction des paramètres d'usinage utilisés. Dans cette méthode, l'approche faite des procédés d'usinage est plus globale et peut donc s'appliquer aussi bien sur des procédés de coupe (tournage) que d'abrasion (rectification). Le détail de la méthode ainsi qu'une application aux procédés de tournage et de rectification est donné dans cette article.*

### Abstract :

*Nowadays, the residual stresses induced by the manufacturing processes are one of the major field of interest for manufacturers. They are directly related to the local mechanical and thermal loads created at the interface tool/workpiece. The numerical simulations can be a good way to predict their apparition but the simulation is quite complex to perform due to the lack of data about friction, damage laws and numerical parameters. The method proposed in this article consists in a simulation of processes at a macroscopic level. The various loads are determined experimentally and then feed the numerical model. The explanation of the method is detailed and examples are given with the turning and grinding processes.*

**Mots-clefs : Contraintes résiduelles, Tournage, Rectification**

### 1 Introduction

La maîtrise des contraintes résiduelles passe par la compréhension des phénomènes conduisant à leur formation. La plupart des études portant sur le sujet montrent que les contraintes résiduelles induites par les procédés d'usinage sont liées aux chargements thermomécaniques et aux transformations métallurgiques. Ces chargements ont plusieurs origines : labourage, frottement, écrouissage... Certains auteurs ont tenté de modéliser ces opérations d'usinage à l'aide de la méthode des éléments finis de façon à observer la génération des contraintes résiduelles [Barge 2005]. Cette première approche a permis l'obtention de premiers résultats mais également la mise en avant de plusieurs niveaux de problèmes:

- la gestion du contact entre outil, copeau et pièce dépend de nombreux paramètres numériques et est de ce fait difficile à mettre en oeuvre,
- les modèles d'endommagement nécessaires à la séparation du copeau et de la pièce ne sont souvent que supposés,
- les maillages utilisés présentent de fortes distorsions impliquant généralement des procédures complexes de remaillage,

- la complexité des modèles et les temps de calculs importants sont souvent des freins à leur utilisation pour des applications industrielles.

La méthode présentée dans la deuxième partie de cet article consiste en une approche plus globale des chargements engendrés par les procédés. Elle permet donc de s'affranchir en grande partie des problèmes précédemment cités et offre en outre la possibilité d'être adaptable à de nombreuses configurations. Les parties suivantes proposent son application aux procédés de tournage et de rectification.

## 2 Une approche globale des procédés

### 2.1 Principe de la méthode

Devant la complexité des problèmes rencontrés lors de la simulation complète d'un point de vue local, l'idée proposée est de modéliser les phénomènes d'un point de vue global. Ainsi plutôt que de se soucier des phénomènes complexes qui régissent l'enlèvement de matière, on se concentre sur la modélisation de leurs conséquences. La figure 1 illustre cette approche dans le cas d'une opération de coupe. En effet la coupe d'un matériau est gérée par des phénomènes complexes (figure 1-a) qui génèrent à la fois des sollicitations mécaniques (écrouissage et cisaillement de la matière) et thermiques (lié au frottement entre matériaux et endommagement). Dans une approche globale, ce sont seulement ces chargements qui sont appliqués à un modèle simplifié de la pièce (figure 1-b).

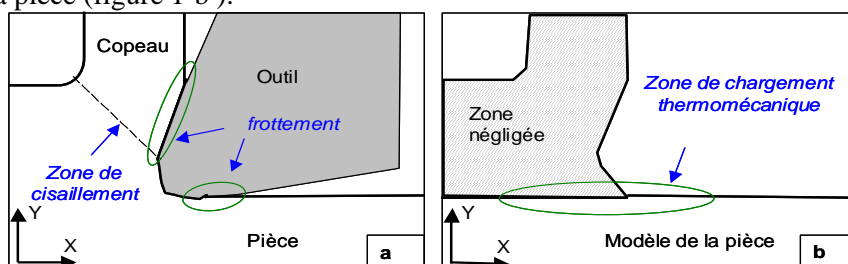


FIG. 1 - Exemple de l'approche locale-globale dans le cas de la coupe :  
a : approche locale, b : approche globale

Ces chargements thermiques et mécaniques sont mesurés expérimentalement et servent de données d'entrée à un modèle numérique. Le chargement mécanique est le résultat des efforts appliqués à la pièce dans les directions X et Y : il peut être mesuré directement à l'aide d'une table d'efforts munie de capteurs piézoélectriques. Le chargement thermique peut être déterminé à partir des champs de température obtenus par thermographie.

Finalement, l'intérêt principal de cette méthode est de simplifier grandement le modèle numérique et de le rendre performant en terme de temps de calcul. En contre partie, cette technique suppose une quantification précise des différentes sources thermiques et mécaniques en fonction des conditions d'usinage, du matériau...

### 2.2 Modèle numérique

Si l'expérimentation nous permet d'obtenir les chargements thermomécaniques, la prédiction des contraintes résiduelles est réalisée par simulation numérique. L'ensemble des calculs est réalisé avec le logiciel d'éléments finis SYSTUS<sup>®</sup> [Systus 2003]. Le modèle représentant la simulation des procédés est du fait de son principe très simplifié. La figure 2 présente ce modèle constitué d'une pièce maillée soumise aux chargements thermomécaniques symbolisant l'action de l'outil (non représenté). Ces sources sont en mouvement à la vitesse de l'outil par rapport à la pièce usinée (vitesse de coupe).

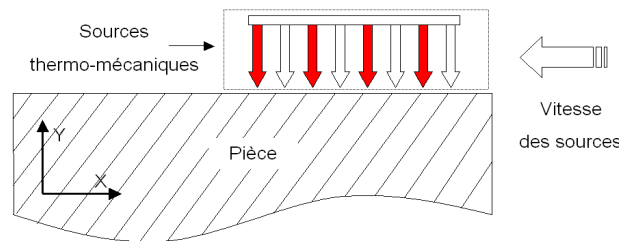


FIG. 2 - Schéma de principe de la méthode

L'ensemble des procédés présentés ici sont représentés par des modèles en deux dimensions et en déformations planes. Ces hypothèses se justifient dans le cas de la coupe orthogonale et de la rectification plane où la pièce peut être assimilée à un corps infini dont on n'étudie qu'une seule section. Finalement, le modèle numérique présenté offre l'avantage d'être simple d'utilisation avec des temps de calcul faibles.

### 3 Application sur les procédés de coupe : exemple du tournage

Conditions d'usinage : **Outil**: Plaquette en carbure de tungstène revêtu TiN ;

**Matériau** : Inox austénitique 316L ;

**coupe orthogonale** :  $V_c$ : 60m.min<sup>-1</sup>,  $f$ : 0.1mm.tr<sup>-1</sup>,  $A_p$ :3 mm.

#### 3.1 Modélisation et quantification des chargements

Dans un premier temps, seule la thermique est prise en compte au niveau de la zone de cisaillement primaire et le rayon d'arête est nul. De plus, les études sont réalisées en configuration orthogonale avec des coefficients de frottements issu de la bibliographie.

##### Nature, localisation et longueur du chargement

Deux zones de chargements thermomécaniques sont présentes en tournage (figure 3):

- la zone de cisaillement primaire (ZCP) où le cisaillement de la matière génère une quantité importante de chaleur et un fort taux de déformation.
- La zone de cisaillement tertiaire (ZCT) où l'outil exerce une forte pression normale et tangentielle sur la surface usinée.

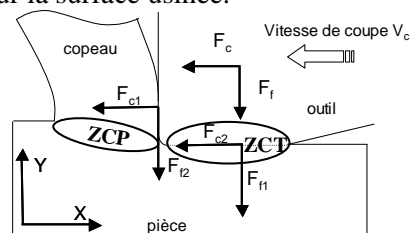


FIG. 3 - Zones de chargement en tournage

##### Chargements thermiques

La répartition de la puissance générée a été supposée de 85% pour la thermique et de 15% pour l'écroutissage en accord avec Shet [Shet 2002]. Cette puissance est le produit de l'effort de coupe  $F_c$  par la vitesse de coupe  $V_c$ . L'effort  $F_c$  peut alors être dissocié en deux composantes notées  $F_{c1}$  et  $F_{c2}$  sur les différentes zones de cisaillement (figure 3). D'un point de vue thermique, la répartition de la chaleur générée fait appel à des coefficients d'échange thermique entre les différentes parties.

- Pour la ZCP, d'après [Schmidt 1949] on prend : 10% dans pièce, 5% dans outil, 85% dans le copeau.
- Pour la ZCT, expérimentalement : 75 % de chaleur pour la pièce et 25% pour l'outil.

Au final, la puissance thermique issue de la ZCP ( $P_{thp}$ ) appliquée à la pièce est :

$$P_{thp} = 0.85 \times 0.1 \times F_{c1} \times V_c \quad (1)$$

Elle est appliquée sous la forme d'un flux thermique rectangulaire dont la densité est fixée par l'épaisseur du copeau (0.3 mm) et l'épaisseur de la pièce (3 mm).

De la même manière, la puissance mise en jeu au niveau de la ZCT est le produit de la vitesse de coupe par l'effort de coupe  $F_{c2}$ . La puissance thermique appliquée dans cette zone est de :

$$P_{thp} = 0.75 \times F_{c2} \times V_c \quad (2)$$

Cette puissance est appliquée sous la forme d'un flux thermique de forme rectangulaire dont la densité est fixée par la longueur de contact en face de dépouille (0.06 mm) et l'épaisseur de la pièce (3 mm).

### Chargement mécanique

Les mesures d'efforts réalisées pendant l'opération de tournage en configuration orthogonale permettent de quantifier l'effort de coupe  $F_c$  et l'effort d'avance  $F_f$ . En faisant deux hypothèses sur les coefficients de frottement [Puigsegur 2002] en face de coupe et en face de dépouille il est possible d'écrire un système constitué de quatre équations avec quatre inconnus.

$$F_c = F_{c1} + F_{c2}; \quad F_f = F_{f1} + F_{f2}; \quad F_{f1} = \mu_{rf} * F_{c1}; \quad F_{f2} = \mu_{rf} * F_{c2} \quad (3)$$

Le chargement mécanique du modèle se traduit par l'application de pressions sur la surface usinée. Ces pressions sont régies par la longueur de contact en face de dépouille (0.06mm).

### Valeur et forme du chargement

La source thermique appliquée au niveau de la ZCP est de 103W appliquée sur une surface de  $1\text{mm}^2$  soit  $103\text{W}\cdot\text{mm}^{-2}$ . La source thermique appliquée au niveau de la ZCT est de 75W appliqué sur une surface de  $0.111\text{mm}^2$  soit  $675\text{W}\cdot\text{mm}^{-2}$ . La pression normale appliquée au niveau de la ZCT est de 1800MPa et la pression tangentielle de 350MPa.

## 3.2 Modèle éléments finis

Le modèle numérique est constitué d'un massif sur lequel sont appliqués les chargements thermomécaniques. Le maillage est constitué d'éléments quadrangles dans la zone raffinée située immédiatement sous la peau de la pièce (figure 4).

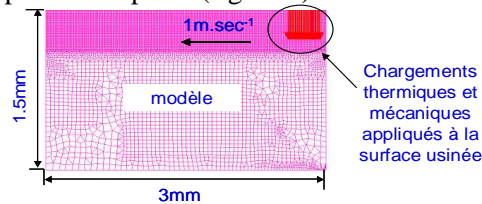


FIG. 4 - Modèle éléments finis : maillage et chargements

## 3.3 Premiers résultats

Les premiers résultats présentés figure 5 sont en accord avec les mesures expérimentales. On observe une zone en traction immédiatement sous la peau de la pièce puis un passage rapide à un état de compression avant de retrouver un état originel.

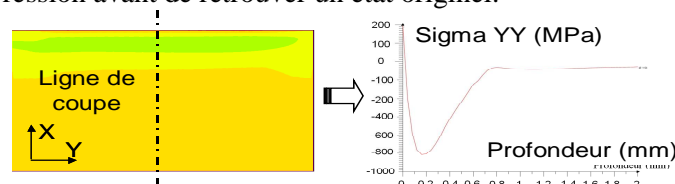


FIG. 5 - Exemple de contraintes résiduelles simulées

## 4 Application sur les procédés d'abrasion : exemple de la rectification

Conditions d'usinage : **Outil** : face des grains abrasifs de la meule ;

**Matériau** : inox martensitique ;

**rectification plane** ;  $V_c$  : 60 m/s,  $A_p$  : 0,1 mm.

### 4.1 Modélisation et quantification des chargements

Le procédé d'enlèvement de matière par abrasion est très complexe. La génération des copeaux est lié à plusieurs phénomènes qui se produisent aléatoirement sur l'ensemble des grains abrasifs de la meule : Ecouissage ; Labourage (frontal ou latéral) ; Coupe (similaire au tournage) ; Usure de la meule (arrachement de grain ...). Plusieurs auteurs [Malkin, Rowe ] ont tenté de modéliser ce procédé mais la complexité d'intégration de l'ensemble de ces phénomènes dans un modèle est aujourd'hui un frein à la simulation de la génération des contraintes résiduelles d'abrasion. La méthode proposée dans cet article révèle alors tout son intérêt en ne s'intéressant qu'aux sollicitations d'un point de vue global. La figure 6 présente les différents paramètres liés à ce procédé.

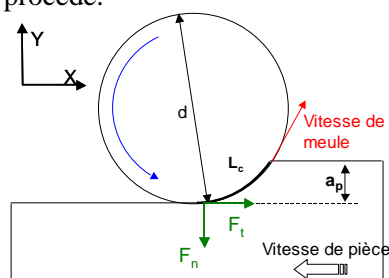


FIG. 6 - Paramètres en rectification plane

#### Nature, localisation et longueur du chargement

En rectification, il est souvent admis que la totalité de la puissance absorbée est transformée en chaleur à l'interface meule/pièce. Le chargement appliqué est donc purement thermique sur la totalité de la longueur de contact entre meule et pièce. Une très bonne approximation de cette longueur  $L_c$  est donné par la relation :  $L_c = \sqrt{A_p \cdot d}$  (4)

#### Valeur et forme du chargement

La puissance mécanique absorbée en rectification est égale au produit de la vitesse de coupe par l'effort d'abrasion. On suppose que 75% de la chaleur est dissipée en chaleur dans la pièce, le reste étant évacué dans la meule, le copeau et le liquide de coupe [Rowe 1997]. Soit :

$$P = 0,75 \cdot F_t \cdot V_c \quad (5)$$

Plusieurs hypothèses ont été formulées dans la littérature sur la forme du flux le long de la longueur de contact [Chen 2000]. Le plus proche aujourd'hui d'un point de vue énergie spécifique d'abrasion est donnée par une forme de flux triangulaire [Hamdi 2000].

### 4.2 Modèle éléments finis

Le modèle présenté figure 7, réalisé sous SYSTUS<sup>®</sup>, présente un raffinement au niveau de la peau de la pièce. Les éléments utilisés sont des quadrangles et l'option de calcul est de type : « thermique plane convection » [Systus 03] qui correspond au calcul d'un état stationnaire de température. Cette option de calcul revient à supposer que le problème thermique est plan.

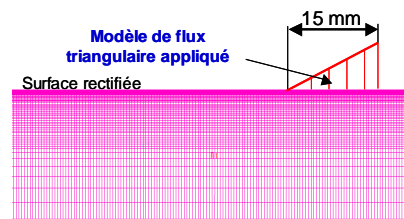


FIG. 7 - Modèle éléments finis : maillage et chargements

### 4.3 Premiers résultats

La figure 8 présente les isovaleurs des températures dans la pièce rectifiée avec une puissance de 200W. Ces premiers résultats sont en accord avec les mesures que l'on a pu réaliser.

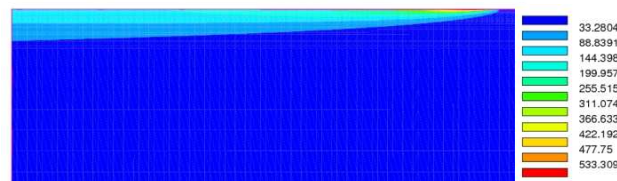


FIG. 8 - Isovaleurs de température en °C

## 5 Conclusions

Les études de faisabilité concernant la méthode local-globale en tournage et en rectification ont montré l'efficacité d'une telle approche. Les résultats obtenus en appliquant directement les chargement thermomécaniques sur la pièce usiné sont cohérents et se rapprochent des valeurs expérimentales. La difficulté revient cependant à déterminer de manière empirique les valeurs, les répartitions ainsi que les positions des chargements. Pour ce faire, un ensemble de manipulation est mis en œuvre. Des résultats d'étude plus précises seront présentés ultérieurement.

## Références

- Barge, M. 2005 Etude expérimentale et numérique des mécanismes de coupe par abrasion, thèse E.C.L., Lyon
- Systus, Sysweld 2003 Reference manual, ESI Group
- Shet, C. 2002 A finite element study of the effect of friction in orthogonal metal cutting, *Elsevier Science* **43**, 573-587
- Schmidt, A.O. 1949 Distribution of heat generated in drilling, *ASME* **71**, 245-252
- Puigsegur, L. 2002 Caractérisation thermique d'un procédé d'usinage par tournage. Approche analytique et par identification de systèmes non entiers, thèse université Bordeaux
- Malkin, S. 1989, Grinding technology: theory and applications of machining with abrasives, *Soc. Manuf. Eng.*, 9-17
- Rowe W. B., Black S. C. E., Mills B., Morgan M. N. Qi H. S., 1997 Grinding temperatures and energy partitioning, *Proceedings. Royal. Society. London.* **453**, 1083-1104
- Chen X., Rowe W.B., McCormack D.F. 2000 Analysis of the transitional temperature for tensile residual stress in grinding, *Journal of Materials Processing Technology* **107**, 216-221
- Guo, C. Malkin, S. 1992 Heat transfer in grinding, *J. Matl Proc. Mfr Sci.* **1**, 16-27
- Hamdi, H. 2000 Contribution à l'étude de la physique de l'interface meule-pièce dans le cadre de la rectification traditionnelle et à grande vitesse, thèse E.C.L., Lyon