

# Analyse des contraintes résiduelles en fraisage à bout sphérique d'un acier 42CrMo4

S. BELKACEM CHEBIL<sup>a</sup>, W. BENSALEM<sup>b</sup>

a. LGM , ENIM, rue Ibn Aljazzar 5000 Monastir Tunisie , [belkacemsonia@hotmail.fr](mailto:belkacemsonia@hotmail.fr)

b. LGM , ENIM, rue Ibn Aljazzar 5000 Monastir Tunisie , [wacef.bensalem@hotmail.fr](mailto:wacef.bensalem@hotmail.fr)

## Résumé :

*Les contraintes résiduelles résultantes par enlèvement de matière ont une influence majeure sur la durée de vie des pièces usinées, notamment en ce qui concerne sa résistance à la corrosion et sa durée de vie à la fatigue. Pour cette raison, la prédiction numérique de la distribution des contraintes résiduelles a fait l'objet de plusieurs travaux. Mais la plupart de ces modèles numériques sont développés pour des configurations de coupe orthogonale ou oblique. La modélisation d'un procédé d'usinage permet de fournir plus d'informations sur les phénomènes physiques et tribologiques aux interfaces de coupe. Dans ce papier, un modèle numérique du procédé de fraisage à bout sphérique a été développé afin de caractériser les contraintes résiduelles et d'étudier l'influence de l'inclinaison de l'outil sur celles-ci.*

## Abstract :

*In this paper, a numerical approach has been developed to predict the near surface residual stresses resulting from ball-end milling process of AISI 4140 steel. This approach is performed using the commercial finite element code Abaqus– Explicit.*

*The simulated residual stress distribution in the machined surface resulting from milling has been experimentally validated by X-ray diffraction measurements.*

*Using this method, the effects of tool- workpiece inclination angle on workpiece residual stresses are discussed.*

## Mots clefs :

**Contraintes résiduelles, angle d'inclinaison de l'outil, fraisage à bout sphérique, simulation numérique**

## 1 Introduction

Dans les opérations d'usinage, l'objectif visé est une optimisation pour sélectionner la géométrie d'outil, la configuration d'usinage et les conditions de coupe appropriées.

Des développements de modélisation par éléments finis sont alors utilisés pour atteindre cet objectif et étudier l'influence des paramètres du processus.

Quelques auteurs proposent des résultats pour différentes études, Lo [1] étudie l'effet de l'angle de coupe dans un alliage de cuivre et [2] étudie l'influence du rayon de l'outil. Leur but était toujours d'établir une méthodologie fiable pour optimiser le processus d'usinage.

Puisque la formation de copeaux est le phénomène en commun de tous les processus de coupe, plusieurs études ont été faites pour décrire les mécanismes de formation, de segmentation et de flux de copeaux.

Bien que dans ce domaine, les outils de simulation numérique nécessitent de prendre en compte les conditions de contact sévères, les déformations plastiques dans les zones de cisaillement et les distributions de contraintes dans la pièce usinée.

En général et dans la majorité des travaux, les distributions de contraintes résiduelles sont prédites à partir de mesures expérimentales [3]. Cependant, peu de travaux proposent la modélisation numérique des processus d'usinage tels que l'opération de fraisage et la méthode des éléments finis a été adoptée par Maurel-Pantel [4] pour obtenir les efforts de coupe numériques durant les opérations de fraisage d'épaulements et utilisée par Ben Moussa [5] pour prédire les contraintes résiduelles et la déformation plastique en coupe orthogonale de tournage.

Nous trouvons de nombreux travaux présentant l'influence des paramètres de coupe sur les résultats tels que la vitesse de coupe, la vitesse d'avance, les profondeurs axiales et radiales de coupe.

L'inclinaison de l'outil a été aussi un facteur influençant sur le procédé de fraisage à bout sphérique et a fait l'objet de nombreuses études. Ces études abordent ce paramètre à travers des modèles analytiques de fraisage et des essais expérimentaux pour analyser son effet sur les résultats de fraisage [6,7]. Mais il est plus approprié et plus rentable d'étudier cette influence à partir de modèles numériques de processus de fraisage.

Dans ce travail, nous allons développer une approche numérique pour prédire la répartition des contraintes résiduelles résultantes du processus de fraisage à bout sphérique. La simulation numérique est réalisée avec le code de calcul par éléments finis Abaqus-Explicit, elle est validée par la suite par des mesures de profils de contraintes résiduelles déterminées expérimentalement sur des échantillons en acier inoxydable AISI 4140 usinés. Nous allons ensuite étudier l'effet de l'inclinaison de l'outil sur la distribution des contraintes résiduelles sur la pièce après fraisage.

## 2 Description du modèle numérique 3D du fraisage à bout sphérique

Un modèle numérique 3D avec couplage thermomécanique a été développé. La géométrie et les conditions initiales du modèle sont présentées à la figure 1.

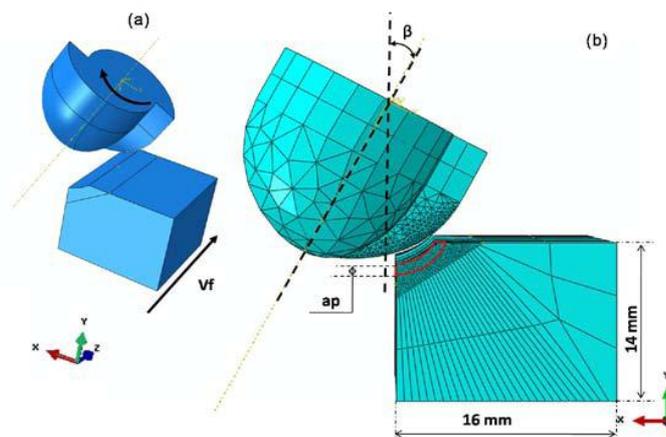


Fig.1: Géométrie et maillage de l'ensemble outil-pièce du modèle de coupe 3D

Pour l'assemblage de ce modèle, nous avons défini une partie rigide (l'outil à bout sphérique) et une partie déformable (la pièce à usiner). Vu que le maillage des deux parties rigide et déformable admet une influence très importante sur les résultats des simulations de contact, nous avons fait une étude pour le choix de type et de la taille d'élément de maillage afin de fournir une bonne stabilité des résultats.

Le maillage de la pièce dans la zone de coupe a été avec des éléments hexaédriques. Le maillage doit être suffisamment fin dans la zone de coupe, mais la zone non sollicitée doit présenter un maillage dégressif permettant de diminuer le nombre d'éléments total de calcul.

La taille des éléments hexaédriques dans les zones de cisaillements a été réduite à environ 35  $\mu\text{m}$ .

Le maillage de l'outil utilisé est avec des éléments de type tétraédrique raffiné au niveau de l'arête de coupe.

Nous avons défini deux conditions aux limites, la première consiste à limiter le mouvement de l'outil à la rotation autour de son propre axe (l'axe faisant un angle  $\beta$  par rapport à l'axe Y (Fig.1)).

La deuxième consiste à laisser seulement le mouvement de translation de la base de la pièce dans la direction d'avance (axe Z).

Un couplage thermomécanique est considéré pour les simulations numériques. La loi de comportement mécanique utilisée pour le matériau de la pièce à usiner est celle proposée par Johnson et Cook :

$$\sigma = \left( A + B (\varepsilon_p)^n \right) \left[ 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_{p0}} \right) \right] \left[ 1 - \left( \frac{T - T_{\text{amb}}}{T_{\text{fus}} - T_{\text{amb}}} \right)^m \right]$$

Avec :  $A = 792 \text{ MPa}$ ,  $B = 510 \text{ MPa}$ ,  $n = 0.26$ ,  $C = 0.014$ ,  $m = 1.03$ ,  $\dot{\varepsilon}_0 = 1 \text{ s}^{-1}$ ,  $T_{\text{fus}} = 1530 \text{ °C}$  et  $T_{\text{amb}} = 23 \text{ °C}$ . [8]

Les propriétés physiques de l'acier 42CrMo4 de la pièce à usiner sont présentées dans le tableau 1.

Densité $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Module Elastique (GPa)	Coefficient de Poisson $\nu$	Chaleur spécifique $C_p$ (J.kg <sup>-1</sup> . °C <sup>-1</sup> )	Conductivité thermique $\lambda$ (W.m <sup>-1</sup> .C <sup>-1</sup> )	Tfus (°C)
7800	200	0.3	477	46	1530

Tableau 1: Les propriétés physiques de l'acier 42CrMo4, [8]

La formation et la segmentation de copeau sont fortement liées à l'interface outil-pièce. Donc il est nécessaire d'introduire le contact et définir le comportement mécanique à l'interface de coupe qui est modélisé par un frottement de coulomb statique  $\mu = 0.2$  dans notre modèle numérique.

### 3 Confrontation numérique-expérimentale des contraintes résiduelles

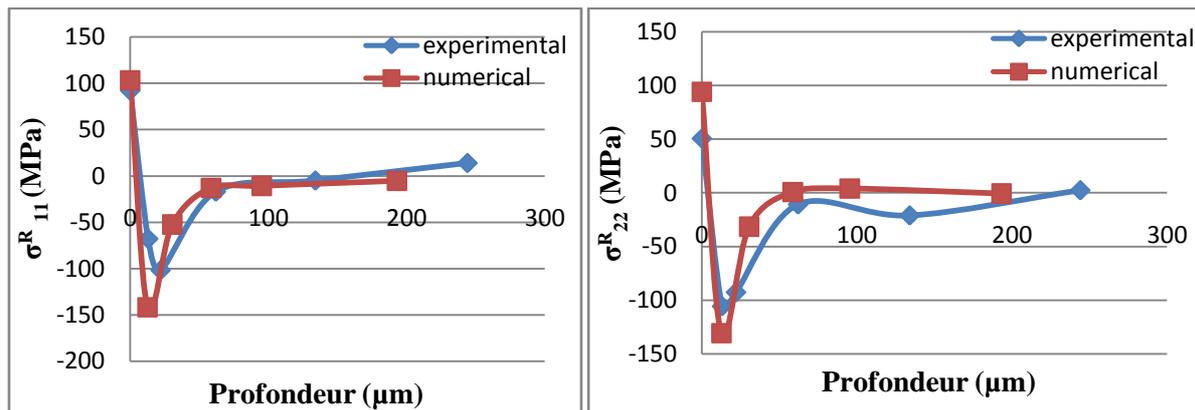
La comparaison entre la simulation numérique et l'expérimental est présentée à la Figure 2. Cette comparaison est très importante pour valider le modèle numérique du fraisage développé. Pour cela, nous avons comparé les profils des contraintes résiduelles obtenus numériquement (de la simulation numérique) et expérimentalement (par des mesures par diffraction des rayons X).

Ces résultats sont obtenus dans les mêmes conditions de coupe (Inclinaison de l'outil  $\beta = 30^\circ$ , Fréquence de rotation  $N = 6800 \text{ tr/min}$ , Avance  $f = 0.1 \text{ mm/tr/dent}$ ).

La figure 2 montre un bon accord entre les contraintes résiduelles simulées et mesurées en profondeur. En effet, les contraintes résiduelles de compression sont de même ordre de grandeur et les pics de compression des deux courbes sont presque situés à la même profondeur.

Selon les distributions de contraintes résiduelles tracées, on peut noter que les contraintes résiduelles dans la direction de coupe ( $\sigma_{11}^r$ ) et celles dans la direction axiale ( $\sigma_{22}^r$ ) sont toutes deux de traction dans les couches superficielles.

Ensuite, on note que lorsque la profondeur augmente en sous couches, ces contraintes obtenues numériquement et expérimentalement se stabilisent. Et la valeur moyenne de la profondeur de stabilisation est de 0,15 mm.



**Fig.2: Comparaison des contraintes résiduelles expérimentales (DRX) et numériques (ABAQUS) ( $\beta = 30^\circ$ ,  $N = 6800$  tr/min,  $f = 0.1$  mm/tr/dent)**

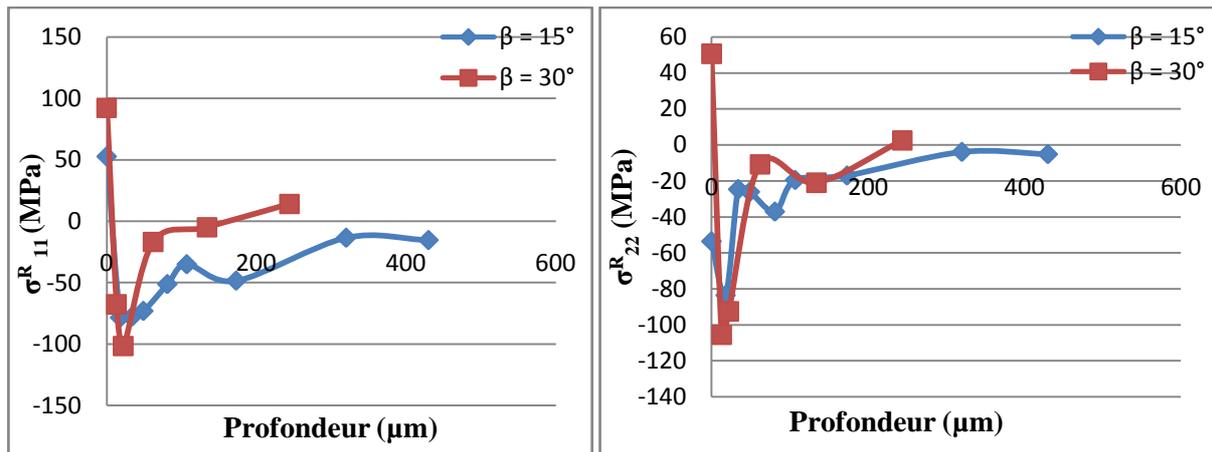
## 4 Influence de l'angle d'inclinaison de l'outil sur les contraintes résiduelles

Cette étude de l'influence de l'inclinaison de l'outil en fraisage à bout sphérique est effectuée expérimentalement (figure 3) puis numériquement (figure 4). Nous avons caractérisé les contraintes résiduelles circonférentielles  $\sigma_{11}^r$  et axiales  $\sigma_{22}^r$  pour deux valeurs d'inclinaison  $\beta = 15^\circ$  et  $30^\circ$ .

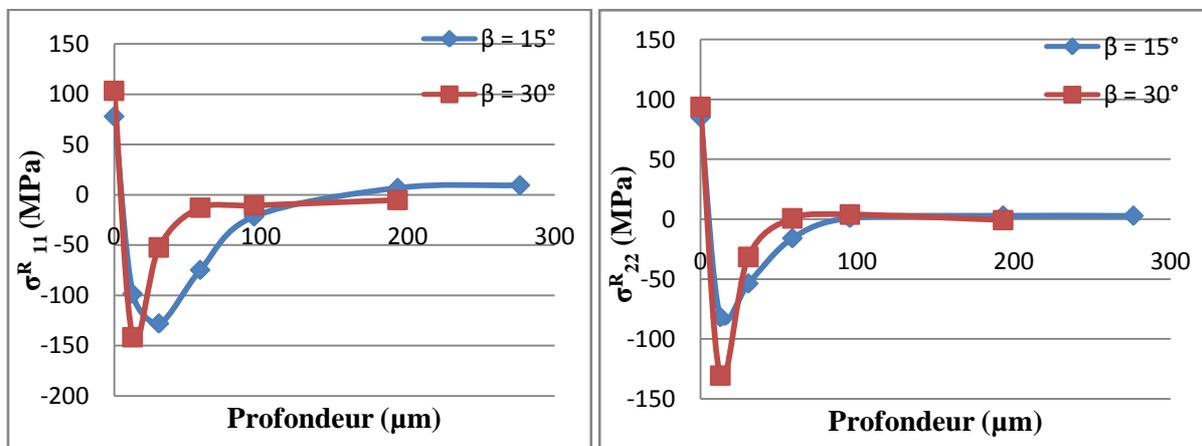
Les résultats présentés sur les figures 3 et 4 montrent que les contraintes résiduelles dans la direction de coupe  $\sigma_{11}^r$  sont supérieures à celles en direction axiale  $\sigma_{22}^r$ , ce qui les rend les plus critiques et les plus influencées par l'inclinaison de l'outil. Ensuite, on note que lorsque la profondeur augmente en sous couches, ces contraintes se stabilisent. Et la valeur moyenne de la profondeur de stabilisation est de 0,15 mm.

On constate également que l'angle d'inclinaison a une influence significative sur l'épaisseur des couches affectées et sur les contraintes résiduelles proches de la surface. Cette influence est vérifiée expérimentalement et numériquement en figures 3 et 4. En effet, les pics de traction à la surface usinée augmentent lorsque l'angle d'inclinaison  $\beta$  augmente. Alors que les pics de compression sont situés à la même profondeur.

De plus, on peut observer une réduction de l'épaisseur des couches affectées par les contraintes lorsque l'angle d'inclinaison de l'outil augmente. Cette réduction est plus significative pour les contraintes résiduelles dans la direction de coupe.



**Fig.3: Influence de l'angle d'inclinaison  $\beta$  sur les contraintes résiduelles mesurées expérimentalement ( $N = 6800$  tr/min,  $f = 0.1$  mm/tr/dent)**



**Fig.4: Influence de l'angle d'inclinaison  $\beta$  sur les contraintes résiduelles numériques ( $N = 6800$  tr/min,  $f = 0.1$  mm/tr/dent)**

## 5 Conclusions

Un modèle numérique du procédé de fraisage à bout sphérique a été développé. Ce modèle sera utile pour la prédiction des résultats de ce procédé d'usinage. Des mesures expérimentales de contraintes résiduelles ont été utilisées afin de valider celles obtenues par les simulations numériques.

Cette méthode numérique est plus rentable et plus efficace pour étudier l'influence des paramètres de coupe. Elle nous a permis en particulier d'étudier l'influence de l'inclinaison de l'outil sur les contraintes résiduelles. Cette étude a montré qu'il est possible de réduire la profondeur affectée par les contraintes en augmentant l'angle d'inclinaison de l'outil. Cela a été vérifié numériquement et expérimentalement.

## Références

- [1] S. Lo, An analysis of cutting under different rake angles using the finite element method, Journal of Materials Processing Technology 105 (2000) 143–151

- [2] Y. Yen, A. Jain, T.A. Altan, Finite element analysis of orthogonal machining using different tool edge geometries, *Journal of Materials Processing Technology* 146 (2004) 72–81
- [3] A. Hadj Ali, Étude de l'influence des conditions de coupe en usinage 5 axes sur l'intégrité des surfaces par la méthode des surfaces de réponses, thèse, Ecole de Technologie Supérieure, Université du Québec, 2005
- [4] A. Maurel-Pantel, M. Fontaine, S. Thibaud, J.C. Gelin, 3D FEM simulations of shoulder milling operations on a 304L stainless steel, *Simulation Modelling Practice and Theory* 22 (2012) 13–27
- [5] N. BenMoussa, H.Sidhom, C.Braham, Numerical and experimental analysis of residual stress and plastic strain distributions in machined stainless steel, *International Journal of Mechanical Sciences* 64 (2012) 82–93
- [6] M. Fontaine, A. Devillez, A. Moufki, D. Dudzinski, Modelling of cutting forces in ball-end milling with tool–surface inclination Part II: Influence of cutting conditions, run-out, ploughing and inclination angle, *Journal of Materials Processing Technology* 189 (2007)
- [7] K.-D. Bouzakis, P. Aichouh, K. Efstathiou, Determination of the chip geometry, cutting force and roughness in free form surfaces finishing, with ball end tools, *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 43 (2003) 499–514
- [8] M. Barge, Experimental and numerical study of abrasive cutting mechanisms, Thèse, Ecole Centrale de Lyon (France), 2005