

# Analyse des efforts de coupe en fraisage à bout sphérique d'un acier AISI 4140

S. BELKACEM CHEBIL<sup>a</sup>, M. BENSAID<sup>b</sup>, W. BENSALÉM<sup>a</sup>

a. LGM, National Engineering School of Monastir, University of Monastir, Monastir, Tunisia,  
belkacemsonia@hotmail.fr

b. UGPMM, National Engineering School of Sfax, Sfax BP 1173, Tunisia

## Résumé :

*Cette étude présente une approche numérique développée pour prédire les efforts de coupe résultants du processus de fraisage à bout sphérique de l'acier AISI 4140. Cette approche a été développée en utilisant le code commercial à éléments finis Abaqus– Explicit.*

*De nombreux facteurs contribuent à la stabilité et à la précision des résultats de la simulation. Il est donc important de bien identifier ces facteurs dans un modèle numérique.*

*En utilisant cette méthode, l'effet de l'angle d'inclinaison de l'outil sur les efforts de coupe a été établi. L'inclinaison outil/pièce représente ainsi le paramètre clé influençant sur les efforts de coupe. Les résultats de la simulation ont été comparés par des résultats expérimentaux effectués sur l'acier AISI 4140.*

## Abstract :

*This work presents a numerical approach developed to predict the cutting forces resulting from the ball-end milling process of AISI 4140 steel. This approach was developed using the commercial finite element code Abaqus– Explicit.*

*Many factors contribute to the stability and accuracy of simulation results. Therefore, it is important to identify these factors well in a numerical model.*

*Using this method, the effect of the tool-workpiece inclination angle on cutting forces was established. The tool-workpiece inclination was found to be the key parameter influencing the cutting forces. The simulated results were compared by experiments carried out on AISI 4140 stainless steel.*

**Mots clefs :** *Fraisage à bout sphérique; Simulation numérique; Efforts de coupe ; Inclinaison outil/pièce*

## 1 Introduction

Malgré l'évolution des procédés de mise en forme et l'apparition de nouvelles techniques, l'usinage par enlèvement de matière reste encore le procédé de fabrication le plus répandu. Le fraisage à bout sphérique est le procédé le plus utilisé pour l'usinage à grande vitesse des surfaces complexes vue qu'il permet d'améliorer la productivité et l'état de surface des pièces usinées. L'objectif visé de ce procédé d'usinage est une optimisation pour sélectionner la géométrie d'outil, la configuration d'usinage et les conditions de coupe appropriées. Des phénomènes tribologiques complexes aux interfaces outil-copeau-matière nécessitent de mettre en place des études par des outils de simulation numérique. On trouve de nombreux travaux présentant l'influence des paramètres de coupe sur les résultats tels que la vitesse de coupe [1], la vitesse d'avance [2], les profondeurs axiales et radiales de coupe [3].

L'inclinaison de l'outil est un facteur influençant sur le procédé de fraisage à bout sphérique et fait l'objet de nombreuses études. Ces études abordent ce paramètre à travers des modèles analytiques et des essais expérimentaux pour analyser son effet sur les résultats de fraisage[4]. Mais il est plus approprié et plus rentable d'étudier cette influence à travers des modèles numériques de processus de fraisage.

Dans la présente étude, une modélisation par éléments finis du procédé de fraisage à bout sphérique a été développée. Cette approche numérique permet de caractériser les efforts de coupe résultants lors du fraisage. Ces efforts numériques ont été comparés par des résultats déterminés expérimentalement lors du fraisage des échantillons en acier inoxydable AISI 4140. Ensuite, une étude de l'influence de l'inclinaison de l'outil sur ces efforts de coupe a été effectuée.

## 2 Modèle numérique 3D du fraisage à bout sphérique

Un modèle numérique 3D du processus de fraisage à bout sphérique a été développé à l'aide du logiciel Abaqus / Explicit®.

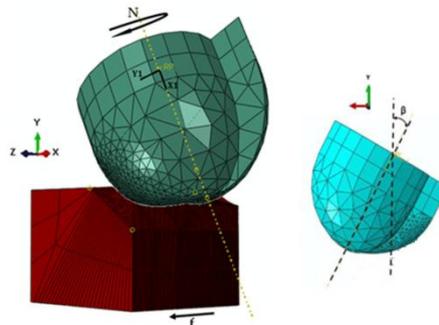
Le principe et les conditions aux limites de ce modèle sont illustrés à la Figure 1.

Les différentes parties impliquées dans notre modèle sont, la fraise à bout sphérique (définie comme un corps rigide) et la pièce à usiner modélisée comme une pièce déformable. Les phénomènes physiques se produisant aux interfaces outil / pièce pendant le processus de fraisage sont modélisés à l'aide d'un algorithme de contact de pénalité.

Le maillage de la pièce dans la zone de coupe était suffisamment fin et avec des éléments hexaédriques. Par conséquent, la taille des mailles des éléments hexaédriques dans les zones de cisaillement a été réduite à 35 µm.

Cependant, la partie non sollicitée de la pièce doit avoir un maillage grossier pour réduire le nombre total d'éléments de calcul.

Le maillage de l'outil de coupe utilisé est défini par des éléments tétraédriques raffinés au niveau de l'arête de coupe (figure1). Nous avons donné deux conditions aux limites: la première consiste à limiter le mouvement de l'outil à la rotation autour de son propre axe (axe X1 : faisant un angle d'inclinaison  $\beta$  par rapport à l'axe Y). La deuxième consiste à laisser uniquement le mouvement de translation de la base de la pièce dans la direction d'avance (axe Z).



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

Pour les simulations numériques, nous avons introduit les propriétés du matériau de la pièce en acier AISI 4140 et la loi de comportement mécanique proposée par Johnson et Cook :

$$\bar{\sigma} = \left( A + B (\bar{\epsilon}_p)^n \right) \left[ 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_{p0}} \right) \right] \left[ 1 - \left( \frac{T - T_{\text{room}}}{T_{\text{melt}} - T_{\text{room}}} \right)^m \right]$$

Avec :  $A = 595 \text{ MPa}$ ,  $B = 580 \text{ MPa}$ ,  $n = 0.133$ ,  $C = 0.023$ ,  $m = 1.03$ ,  $\dot{\epsilon}_0 = 1 \text{ s}^{-1}$ ,  $T_{\text{melt}} = 1530 \text{ °C}$  and  $T_{\text{room}} = 25 \text{ °C}$ .

Nous avons déterminé ces paramètres à partir de la loi mentionnée par Barge [5] puisque nous utilisons dans ce travail le même alliage du matériau ayant la même dureté.

Le critère d'endommagement était celui de Johnson et Cook qui permet de calculer l'endommagement du matériau, constituant la pièce, ayant lieu au voisinage de l'arête de coupe.

Les propriétés thermo-mécaniques sont introduites dans le code de calcul par éléments finis en fonction de la température pour décrire le comportement du matériau.

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

Parameters Properties	T (°C)	Value
<b>Materials</b>		
Density, $\rho$ [Kg/m <sup>3</sup> ]	20	7844
Elastic modulus, E [GPa]	20	212
Poisson's ratio, $\nu$	20	0.289
Specific heat, $C_p$ [J/Kg.°C]	20-600	$432 + 0.227 \times T$
Thermal Conductivity, $\lambda$ [W/m.°C]	20-600	$-2.10^{-5} \times T^2 - 0.0062 \times T + 43.7$
Thermal expansion [1/°C]	20-700	$-2.37 \times 10^{-11} \times T^2 + 2.27 \times 10^{-8} \times T + 1.06 \times 10^{-5}$
Inelastic heat fraction, $\beta$		0.9
<b>Contact</b>		
Heat transfer coefficient [W/m <sup>2</sup> .K]		$10^8$
Heat partition coefficient		0.5
Friction coefficient		0.2
Friction energy transferred into heat		1

**Tableau.1.** Les propriétés physiques de la pièce, [6]

Le comportement mécanique à l'interface de coupe a été défini par un frottement de Coulomb statique  $\mu = 0.2$  dans notre modèle numérique.

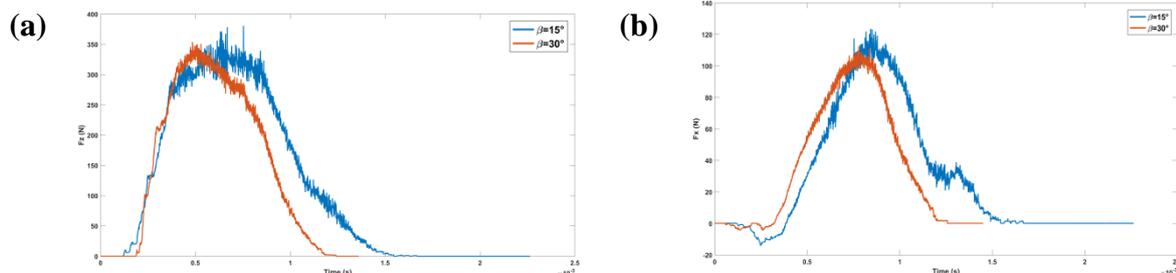
Une formulation de type ALE a été adoptée pour développer un maillage se déplaçant indépendamment de la matière et pour s'affranchir partiellement des problématiques de distorsion de maillage dans la zone de formation du copeau.

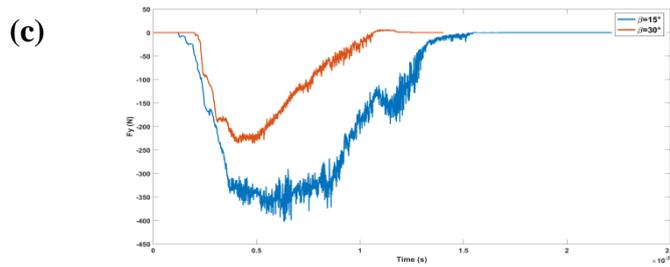
### 3 Influence de l'angle d'inclinaison de l'outil sur les efforts de coupe

Nous proposons de déterminer l'inclinaison la plus favorable de l'outil par rapport à la surface de la pièce afin de limiter les vibrations et les valeurs maximales d'efforts.

La figure 2 présente les trois composantes de l'effort de coupe  $F_x$ ,  $F_y$  et  $F_z$  et les effets de l'angle d'inclinaison  $\beta$ .

Notre simulation est en configuration de fraisage ascendant. L'influence de  $\beta$  sur les efforts de coupe a été analysée pour deux angles d'inclinaison:  $15^\circ$  et  $30^\circ$ . Comme le montre la figure 2, les pics de  $F_x$ ,  $F_y$  et  $F_z$  diminuent lorsque l'angle d'inclinaison augmente. Cela s'explique par le fait que l'inclinaison  $\beta$  évite le fraisage par le bout de la fraise. Ainsi, les valeurs maximales des efforts résultantes deviennent limitées.





**Figure.2.** Effet de l'angle d'inclinaison  $\beta$  sur les composantes  $F_z$ ,  $F_x$  et  $F_y$  de l'effort de coupe

Nous pouvons observer que l'effet de l'inclinaison est faible sur la composante  $F_z$  (a), raisonnable sur la composante  $F_x$  (b) et important sur la composante  $F_y$  (c). En effet, la composante  $F_y$  est liée à l'axe de l'outil de coupe,  $F_z$  est liée à la direction d'avance, donc la coupe selon cette direction est plus précise, et  $F_x$  est la troisième composante (les axes du modèle de simulation numérique).

Ainsi, plus nous augmentons l'angle d'inclinaison, moins nous obtenons de vibrations et d'effets négatifs en agissant principalement sur l'axe de l'outil.

Ces résultats sont en accord avec les résultats trouvés par Fontaine et al. [4] en étudiant l'influence de l'angle d'inclinaison sur les efforts de coupe.

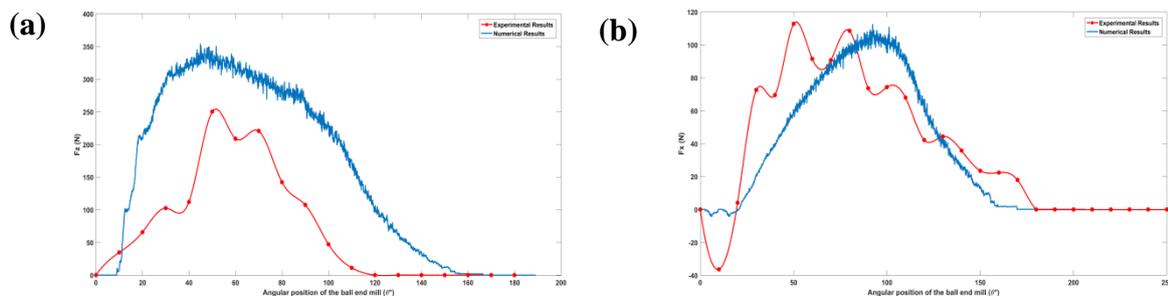
#### 4 Confrontation numérique- expérimentale des efforts de coupe

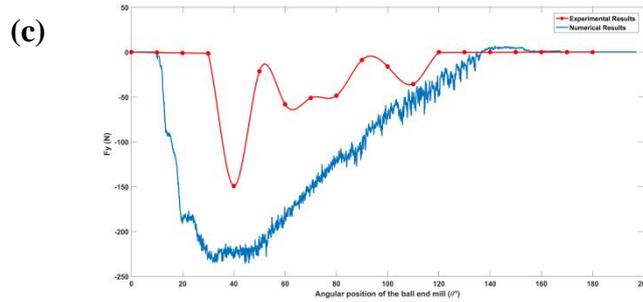
L'étude expérimentale est réalisée en effectuant des essais de fraisage sur l'acier AISI 4140. La machine-outil utilisée est une fraiseuse CNC à 5 axes. Un dynamomètre Kistler à six composants a été installé pour mesurer les efforts de coupe lors de l'usinage. Pour permettre le réglage des inclinaisons outil/pièce, le dynamomètre a été fixé en position inclinée sur la table de la machine (figure 3).



**Figure.3.** Dynamomètre et éprouvette d'essais en position incliné

La figure 4 montre des comparaisons entre la simulation et l'expérience des trois composantes d'effort de coupe  $F_z$  (a),  $F_x$ (b) et  $F_y$ (c) (composantes correspondantes aux axes de la simulation). Celles-ci sont obtenues avec un angle d'inclinaison de l'outil  $\beta = 30^\circ$ . Cette valeur est plus appropriée, puisque nous avons expliqué précédemment que l'augmentation de l'angle d'inclinaison affine les résultats.





**Figure.4.** Comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques des composantes  $F_z$ ,  $F_x$  et  $F_y$

Malgré les différences dues au talonnement au niveau de l'arête de coupe et aux conditions de coupe extrêmes des essais, les courbes des efforts de coupe sont globalement similaires. Par ailleurs, en ce qui concerne les valeurs des efforts, une différence de 28,5% est observée sur la composante  $F_z$  entre simulation et mesure. Ensuite, une différence de 5% est observée sur la composante  $F_x$ . Et la différence la plus importante de 35% est observée sur la composante  $F_y$ , celle liée à l'axe de l'outil de coupe qui est l'axe le plus influencé.

Ces écarts entre les efforts de coupe peuvent être causés par l'effet du mouvement dynamique de l'outil, l'usure et la géométrie de l'outil.

## 5 Conclusion

Une modélisation 3D du procédé de fraisage à bout sphérique a été réalisée. Ce modèle sera utile pour la prédiction des résultats de ce procédé d'usinage. Des mesures expérimentales d'efforts de coupe 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 composantes de l'effort de coupe. Cette étude a montré qu'il est possible d'éviter les effets négatifs et d'améliorer les résultats d'effort de coupe en augmentant l'angle d'inclinaison de l'outil.

## Références

- [1] A. Lamikiz, L.N.L. De Lacalle, J.A. Sánchez, M.A. Salgado, Cutting force estimation in sculptured surface milling, *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 44 (2004) 1511–1526.
- [2] M. Milfelner, F. Cus, Simulation of cutting forces in ball-end milling, *Robot. Comput. Integr. Manuf.* 19 (2003) 99–106.
- [3] G.M. Kim, C.N. Chu, Mean cutting force prediction in ball-end milling using force map method, *J. Mater. Process. Technol.* 146 (2004) 303–310.
- [4] 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, *J. Mater. Process. Technol.* 189 (2007) 85–96.
- [5] M. Barge, Experimental and numerical study of abrasive cutting mechanisms, 2005. doi:10.1016/j.crme.2005.09.005.
- [6] R. M'Saoubi, J.C. Outeiro, B. Changeux, J.L. Lebrun, A. Morão Dias, Residual stress analysis in orthogonal machining of standard and resulfurized AISI 316L steels, *J. Mater. Process. Technol.* 96 (1999) 225–233. doi:10.1016/S0924-0136(99)00359-3.