

# Simulation numérique d'une fissure dans les outils de coupe par la méthode FEM et XFEM

K. BOUNIF<sup>1\*</sup>, M. ABBADI<sup>1</sup>, M. NOUARI<sup>2</sup>

<sup>1</sup> EMCS, ENSAO, BP 696, Oujda, Maroc

<sup>2</sup> LEMTA, Mines Nancy & Albi, GIP-InSIC

\*Email : Khaledbounif100@gmail.com

## Résumé

Dans le présent travail, le code de calcul Abaqus qui repose sur l'analyse par éléments finis a été utilisé pour étudier la fissuration d'un outil de coupe en acier. Lors de l'usinage, l'outil est soumis à de très importantes contraintes thermiques et mécaniques. Les contraintes thermiques à l'interface copeau / outil peuvent atteindre le millier de degré. De plus, la déformation plastique du matériau engendre, par réaction, des contraintes qui provoquent flexions et vibrations de l'outil. En effet, les matériaux usinés sont, par nature, rarement homogènes (phase). Il y a donc variation rapide des contraintes. La combinaison des hautes températures (choc thermique en début d'usinage) et des vibrations peut provoquer des fissures au sein de l'outil. Dans ce travail, on amorce une fissure dans un outil de coupe et on calcule le facteur d'intensité de contrainte  $k_I$  et  $k_{II}$  par la méthode des éléments finis FEM et la méthode des éléments finis étendus XFEM.

**Mots clefs:** Usinage, Fissure, Abaqus, méthode FEM, méthode XFEM.

## 1. Introduction

L'usinage a connu une grande évolution dans ces dernières années, la concurrence sévère a conduit à l'apparition de nouveaux types d'usinage tels que l'usinage à grande vitesse UGV et des machines à commande numérique CNC sans oublier l'usinage par laser, etc. Comme le cas de l'impression 3D des matériaux métalliques, les domaines de l'utilisation de ces applications d'usinage sont divers comme l'usinage aéronautique, médical, nucléaire, etc.

L'industrie aéronautique a été toujours pionnière en termes de recherche et d'innovation, pour répondre aux exigences toujours plus strictes et au besoin d'améliorer les performances techniques et la sûreté des avions. Elle doit aussi faire face à la croissance de la concurrence économique dans le domaine. Ceci a conduit, inévitablement, à l'automatisation des tâches du processus de développement des avions, en intégrant au mieux les diverses activités y compris la conception et la fabrication. L'usinage aéronautique concerne des dizaines de milliers de composants, parfois des centaines de milliers pour les grands avions, et a besoin d'une très haute précision. En outre, il exige des qualifications pointues et une qualité de finition optimale des pièces.

## 2. Usinage

L'usinage est une famille de procédés de fabrication par enlèvement de matière. Il s'effectue par un mouvement relatif entre la pièce à usiner et l'outil de coupe et regroupe différentes techniques de fabrication selon le

type d'outil et la manière d'usiner la pièce. Chaque technique de fabrication a ses spécificités et les sollicitations thermomécaniques aux quelles doivent faire face les outils de coupe différent.

On distingue 3 classes importantes en usinage traditionnel :

- le tournage (chariotage)
- le fraisage
- le perçage

### 2.1. Les outils de coupe

Un outil de coupe est défini par deux plans : la face de coupe et la face de dépouille. L'intersection de ces deux plans constitue l'arête de coupe. En réalité, ces deux plans sont reliés par le rayon de bec  $R$  de l'arête de coupe, mais il est généralement négligé dans l'étude de la coupe orthogonale. Trois angles, dont la somme est égale à  $90^\circ$ , sont nécessaires pour définir les caractéristiques géométriques d'un outil comme présenté sur la Fig.1.

Angle de coupe ( $\gamma_o$ ) : C'est l'angle entre la face de coupe et un plan de référence  $P$  (perpendiculaire à la direction d'usinage). L'angle de coupe affecte la capacité de l'outil à cisailier le matériau à usiner. Il peut être positif, négatif ou nul. Les angles de coupe positifs réduisent les efforts de coupe, tandis que des angles de coupe négatifs apportent de la robustesse à l'arête de coupe de l'outil [1]. Sa valeur se trouve généralement entre  $-5^\circ$  et  $+5^\circ$ , quelque fois entre  $-10^\circ$  et  $+10^\circ$  et plus rarement entre  $-20^\circ$  et  $+20^\circ$ .

Angle de dépouille ( $\alpha_o$ ) : C'est l'angle entre la face de dépouille et la surface usinée. Sa valeur, nécessairement positive, oscille généralement entre  $2^\circ$  et  $10^\circ$ .

Angle de taillant ( $\beta_o$ ) : C'est l'angle entre la face de coupe et la face de dépouille

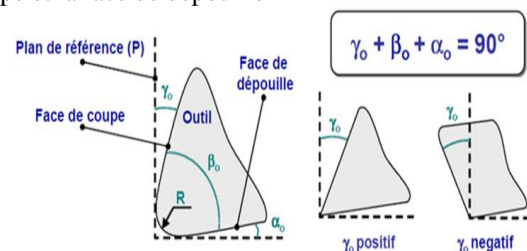


Fig.1 : Les deux géométries utilisées

### 2.2. L'usure et l'endommagement des outils

La qualité des surfaces obtenues est directement liée au degré d'usure de l'outil. Il est donc important de bien caractériser ce phénomène afin de le rendre observable.

#### 2.2.1 L'usure par fissuration

Lors de l'usinage, l'outil est soumis à de très importantes contraintes thermiques et mécaniques. Les contraintes thermiques à l'interface copeau / outil peuvent atteindre le millier de degré. De plus, la déformation plastique du

matériau engendre, par réaction, des contraintes qui provoquent flexions et vibrations de l'outil. En effet, les matériaux usinés sont, par nature, rarement homogènes (phase). Il y a donc variation rapide des contraintes. La combinaison des hautes températures (choc thermique en début d'usinage) et des vibrations peut provoquer des fissures au sein de l'outil [2].

### 2.2.2 L'usure par adhésion

L'usure par adhésion constitue le deuxième mode de dégradation rencontré en usinage. Sous l'effet de la déformation et des effets de micro-coupe, présentés dans le cas de l'abrasion, de nouvelles surfaces en contact se forment et ces surfaces sont très réactives. S'il y a une affinité entre les éléments chimiques des corps en contact, il y a adsorption (soudure froide) ou solubilité (soudure chaude). L'adhésion est favorisée par des températures localement très élevées (températures flash) induites par le contact répété entre les aspérités. Ce mode d'usure a été observé par Han [3] lors de l'usinage des aciers 100Cr6 (AISI 52100), C45 (AISI 1045) et 42CrMo4 (AISI 4140) avec un outil en WC-Co.

### 2.2.3 Usure par diffusion

La diffusion de matière de l'outil vers le copeau est un phénomène d'usure qui ne peut se produire qu'à des températures élevées. Ces zones de températures élevées se situent à l'endroit du frottement du copeau sur l'outil. De plus, ce sont aussi des zones de forte pression car le copeau applique des contraintes sur l'outil.

## 3. La méthode XFEM

Au cours des dernières années, une nouvelle méthode numérique a vu le jour et a été nommée la méthode des éléments finis étendus (XFEM). Cette dernière, contrairement à la méthode classique, se base sur l'enrichissement des nœuds par la fonction Heaviside et les fonctions singulières afin de bien représenter la discontinuité et la singularité de la fissure. Une des bases mathématiques de la méthode XFEM est la méthode de partition de l'unité (PUFEM) proposée par Melenk et al. [4]. L'idée essentielle de cette méthode est d'incorporer des informations connues a priori sur le comportement local de la solution dans l'approximation des éléments finis. Plus précisément, les fonctions enrichies globales qui contiennent des informations sur la solution du problème, sont multipliées par les fonctions de forme nodales. Les fonctions enrichies discontinues sont incorporées dans l'espace standard des éléments finis dans le but de prendre en compte la présence des fissures. Leur étude a révélé un certain nombre de déficiences en raison de l'utilisation des fonctions asymptotiques autour de la pointe des fissures seulement. Les méthodes des éléments finis classiques imposent des conditions éminentes liées au raffinement du maillage en fond de la fissure et au remaillage en cours de propagation ; ce qui a pour effet d'augmenter le temps de calcul et de diminuer la précision des résultats. La méthode XFEM [5] montre un avantage principal qui se manifeste par la représentation de la fissure indépendamment du maillage, ce qui permet donc de mettre à jour la fissure sans avoir à remailler la pièce. Ceci se base sur le rajout dans la base des éléments finis [6] des fonctions prenant en compte la discontinuité des

déplacements le long de la fissure ainsi que la forme asymptotique des déplacements singuliers en fond de la fissure.

La fig.3-a montre l'exemple d'une fissure qui coïncide avec les interfaces des mailles, alors que la fig.3-b décrit une fissure libre.

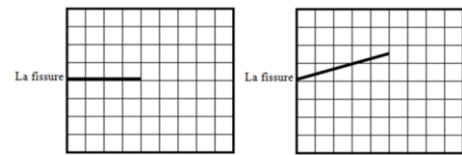


Fig.3 : -a : FEM la fissure coïncide avec les interfaces des mailles -b : XFEM la fissure est libre.

## 4. Simulation numérique

Dans cette étude, on utilise le code de calcul abaqus pour simuler une fissure dans un outil de coupe par la méthode des éléments finis FEM et la méthode des éléments finis étendus XFEM et on fait une comparaison entre les deux méthodes.

### a. Modèle élément fini

Dans cette partie, nous considérons un outil de coupe en acier avec les paramètres illustrés sur la fig.4 ( $V=20$  mm,  $W=30$  mm, angle de coupe  $\gamma_o=5.7^\circ$  et angle de dépouille  $\alpha_o=5.7^\circ$ ), soumis à une contrainte de traction  $\sigma_{app}$  de 20 MPa et encastré à l'autre extrémité (fig.5). Les propriétés mécaniques de l'acier sont représentés dans le tableau suivant :

	E[GPa]	$\nu$
Acier	210	0.3

Tab.1 : Propriétés mécaniques de l'acier utilisé

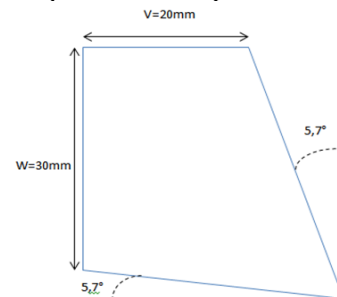


Fig.4 : Paramètres d'outil de coupe utilisée

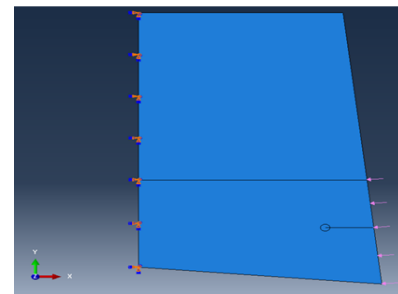


Fig.5 : Condition aux limites

Pour la fiabilité des résultats, la méthode des éléments finis standard (FEM) et celle des éléments finis étendus (XFEM) présentées dans la partie précédente ont été utilisées. Le tab.2 présente le maillage sélectionné pour chaque méthode de calcul. Ces configurations de maillage sont obtenues après une étude approfondie de la convergence du maillage. Nous avons constaté que la

méthode des éléments finis standard demande un maillage très raffiné en comparaison avec la méthode XFEM.

	FEM	XFEM
Type d'élément	CPS4R	CPS4R
Nombre d'éléments	66001	42767
Nombre de nœuds	119548	77258

Tab.2 : Configuration du maillage dans les deux méthodes

### b. Effet de la longueur de la fissure $a$

Pour chaque longueur de fissure  $a$ , les deux méthodes FEM et XFEM sont utilisées pour calculer numériquement la valeur de facteur d'intensité de contrainte  $K_I$  et  $K_{II}$ . La fig.6 illustre l'influence de la longueur de la fissure  $a$  sur les facteurs d'intensité de contraintes  $K_I$  et  $K_{II}$ .

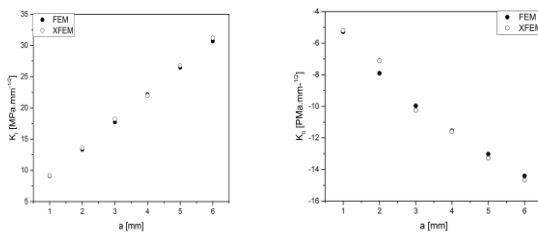


Fig.6 : Effet de la longueur  $a$  sur  $K_I$  et  $K_{II}$

Nous avons constaté que le facteur d'intensité de contrainte  $K_I$  augmente avec l'augmentation de la longueur  $a$  contrairement au facteur d'intensité de contrainte  $K_{II}$  qui présente une diminution.

### c. Effet de la surface de chargement

Maintenant, on varie la surface d'application de la charge mécanique et on calcule toujours les deux facteurs  $K_I$  et  $K_{II}$ . La figure suivante illustre l'évolution des deux facteurs par rapport à la surface du chargement mécanique.

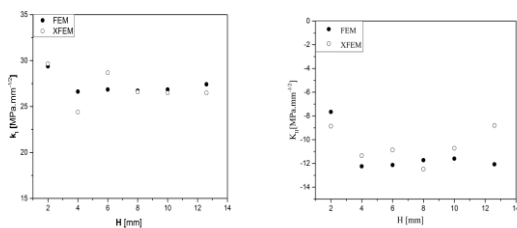


Fig.7 : Effet de la surface du chargement mécanique sur  $K_I$  et  $K_{II}$

Nous avons constaté que  $K_I$  et  $K_{II}$  ne changent pas quelle que soit la surface de chargement.

### d. Effet de la position de la fissure

Dans cette partie on change la position de la fissure et on calcule  $K_I$  et  $K_{II}$  par les deux méthodes. Nous avons constaté que  $K_I$  diminue avec l'augmentation de la longueur  $L$  jusqu'à  $L=8$  et après il augmente. Par contre,  $K_{II}$  reste presque constant jusqu'à  $L=8$  après il y a une augmentation comme l'illustre la fig.8.

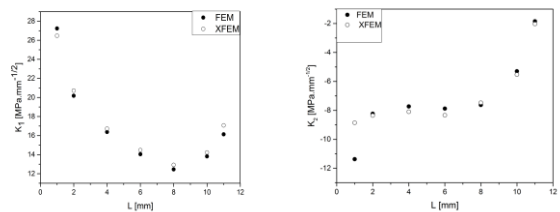


Fig.8 : Effet de la position de la fissure sur  $K_I$  et  $K_{II}$

## 5 Conclusion

Cette étude nous a permis de conclure que :

- Les deux méthodes donnent les mêmes résultats
- La méthode XFEM converge avec un minimum de maillage
- $K_I$  augmente avec l'augmentation de la longueur  $a$
- $K_{II}$  diminue avec l'augmentation de la longueur  $a$
- $K_I$  ne change pas quelle que soit la surface de chargement
- $K_{II}$  ne change pas quelle que soit la surface de chargement
- $K_I$  diminue avec l'augmentation de la longueur  $L$  jusqu'à  $L=8$
- $K_{II}$  reste presque constant jusqu'à  $L=8$  après il y a une l'augmentation

## Références (12 gras)

- [1]. F. Leroy. Endommagement des outils de coupe. Techniques de l'ingénieur. Février 1993. B 7042
- [2]. Pagès, C. (2003). Comportement de revêtements céramiques sur outil en tournage à sec de finition. Mécanique. France, Ecole Centrale de Lyon.
- [3]. S. Han. Mechanisms and modeling of white layer formation in orthogonal machining of steels. PhD thesis, George W. Woodruff School of Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology, May 2006
- [4]. JM Melenk, I Babuka. The partition of unity finite element method: Basic theory and applications. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 1996; 139: 289- 31.
- [5]. J Dolbow. An extended finite element method with discontinuous enrichment for applied mechanics. PhD thesis, Northwestern University 1999.
- [6]. R. Laheurte, « Application de la théorie du second gradient à la coupe des matériaux », Thèse de doctorat. Université de Bordeaux, Ecole Doctorale Des Sciences Physiques et De l'Ingénieur. 2004.