

Simulation numérique de la coupe orthogonale par couplage thermique-comportement-endommagement

Lestriez Philippe ², Saanouni Khémais ¹ et Cherouat Abel ¹

1 : LASMIS-GSM, U.T.T., 12 rue Marie Curie BP 2060, 10010 Troyes Cedex

2 : Laboratoire Structures et Matériaux, E.S.T.A.C.A., 34 rue Victor Hugo, 92300 Levallois Perret

Résumé :

Ce travail est dédié à la simulation numérique de la coupe orthogonale par enlèvement de copeaux à l'aide d'une modélisation prédictive du couplage comportement endommagement en thermo-visco-élasto-plasticité. Ce modèle est mis en application dans le code de calcul Abaqus couplé avec le remaillleur BL2D adaptant la taille des éléments en fonction de critères physiques et géométriques. Les résultats numériques obtenus avec ce procédé basé sur le couplage comportement endommagement sont qualitativement comparés à ceux obtenus avec le procédé classique négligeant l'effet de l'endommagement.

Abstract :

This work is devoted to the presentation of a new methodology of forecast of machining by removal of chip. This methodology is based on the strong coupling between the thermomechanical behavior and the ductile damage. It also uses an adaptation of the size of the elements according to physical criteria (damage, plasticity...) and geometrical (local curves...). This approach is studied and compared with the traditional approach based on the simple viscoplastic flow.

Mots clefs :

Endommagement ; copeau ; visco-plasticité ; thermique ; Abaqus/Explicit

1 Introduction

L'usinage des métaux est une technique de mise en forme par enlèvement de matière, qui bien que très développée et très répandue du point de vue pratique, n'est pas encore maîtrisée du point de vue modélisation théorique et simulation numérique. C'est l'empirisme qui est largement en vigueur dans ce domaine où l'on procède encore par erreur-corréction. En effet, la coupe des métaux fait intervenir de très nombreux phénomènes mécaniques, thermiques et métallurgiques qui doivent être pris en considération pour simuler numériquement ce type de procédé.

Plusieurs travaux dédiés à la simulation numérique des procédés d'usinage par enlèvement de matière se sont développés ces dernières années. Les modèles développés ont permis de prendre en compte plusieurs phénomènes physiques très présents lors de la coupe tels que les grandes vitesses de déformation plastique, la génération de chaleur, le frottement et le contact. Ceci se fait moyennant l'utilisation de formulations par éléments finis faisant appel ou non à un critère de séparation du copeau de la pièce et des modèles de comportement, assurant un couplage plus ou moins fort entre phénomènes mécaniques et thermiques. On distingue deux types de modélisation pour reproduire la formation de copeau:

- Les modèles basés sur l'écoulement viscoplastique de la matière sur les faces de coupe de l'outil. Dans ces modèles, on n'impose ni un chemin ni un critère de séparation du copeau. Il suffit d'imposer des conditions aux limites sur la pièce, sur la géométrie du copeau dans certaines formulations et sur la trajectoire de l'outil. La formation de copeau se fait par écoulement visco-plastique de la matière sur la face de coupe de l'outil. C'est de loin l'approche numérique la plus utilisée dans la littérature [4], [6], [12].

- Les modèles basés sur un critère de rupture pour simuler la formation de copeau. En général deux méthodologies sont utilisées:
- Les méthodes utilisant la technique de relâchement des nœuds devant la pointe de l'outil afin de former le copeau sur la base d'un critère géométrique ou physique. Ces critères consistent en premier lieu à fixer une ligne ou un chemin décrit par des nœuds dédoublés qui vont se détacher au fur et à mesure que l'outil avance. Ce critère a été utilisé dans plusieurs études telles que [10], [11], [7].
 - Les méthodes utilisant la suppression d'éléments sur la base de critères locaux (plasticité, contrainte max, endommagement,...). Au fur et à mesure que l'outil avance, la fissure est initiée et propagée dans les éléments en contact direct avec le bec de l'outil, chaque fois que le critère local atteint une valeur critique qu'on se fixe. Ces éléments seront éliminés pour laisser avancer l'outil. D'autres modèles utilisent la déformation plastique ou la contrainte équivalente dans l'élément comme critère d'élimination. [2], [5], [9].

Dans ce travail, une nouvelle méthodologie numérique de simulation de la coupe est présentée. Basée sur un modèle couplant les différents champs thermomécaniques à l'endommagement ductile, cette méthodologie permet de reproduire assez fidèlement la formation de copeau incluant sa possible segmentation [3,9].

2 Simulation de la coupe orthogonale

L'objectif ici est d'appliquer la modélisation du couplage multi-physique développée pour voir si elle est potentiellement capable de simuler les procédés de coupe orthogonale. Le comportement du matériau est de type viscoplastique où les différents paramètres dépendent de la température. Le matériau utilisé est un alliage d'aluminium AS7U3GT5 ([3], [9]). Suite à des essais de traction effectués à différentes températures, nous avons fait une identification sur un point de Gauss avec le logiciel Zebulon 8.2 puis avec Abaqus/Explicit sur une éprouvette de traction. Comme la plupart de ces paramètres évoluent en fonction de la température, on se propose alors de déterminer pour chacun une loi d'évolution. Ces fonctions sont introduites dans la routine Vumat. Connaissant les différents paramètres du matériau, nous avons simulé plusieurs essais de coupe orthogonale. La pièce à découper est de longueur 50 mm et de largeur 30 mm, $p=1\text{ mm}$ représente la profondeur de passe, $\gamma=10^\circ$ l'angle d'attaque, $\alpha=0^\circ$ l'angle de dépouille et $V_c=0.05\text{ mm/s}$ la vitesse d'avance de l'outil. Le rayon de bec de l'outil est de 0.1 mm. L'élément utilisé est le CPE3RT de la librairie d'Abaqus. La taille minimale de maille utilisée lors de l'identification sur Abaqus étant de 0.2 mm, la taille retenue pour les essais a été $h_{\min}=0.2\text{ mm}$ pour la taille minimale et $h_{\max}=4\text{ mm}$ pour la taille maximale. La pièce est encadrée sur sa partie inférieure et a pour température initiale 20 °C. Le coefficient de frottement de la loi de Coulomb entre la pièce et les outils est supposé constant (indépendant de la température !) de valeur $\mu=0.3$.

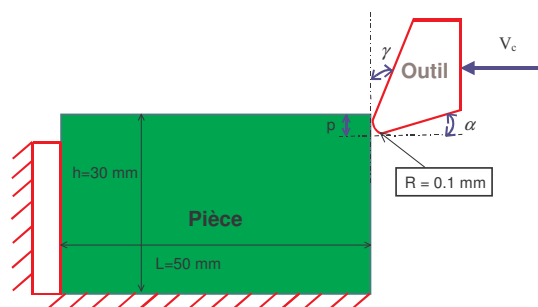


Figure 1 : Usinage en coupe orthogonale

Pour étudier le phénomène de fragmentation du copeau, nous ferons varier la ductilité du matériau de 1.65 % (matériau fragile) à 18.9 % (matériau ductile). Les outils sont supposés rigides.

Sur la Figure 2 sont représentées les isovaleurs de la température pour différentes ductilités pour un déplacement de l'outil de coupe de 4.99 mm.

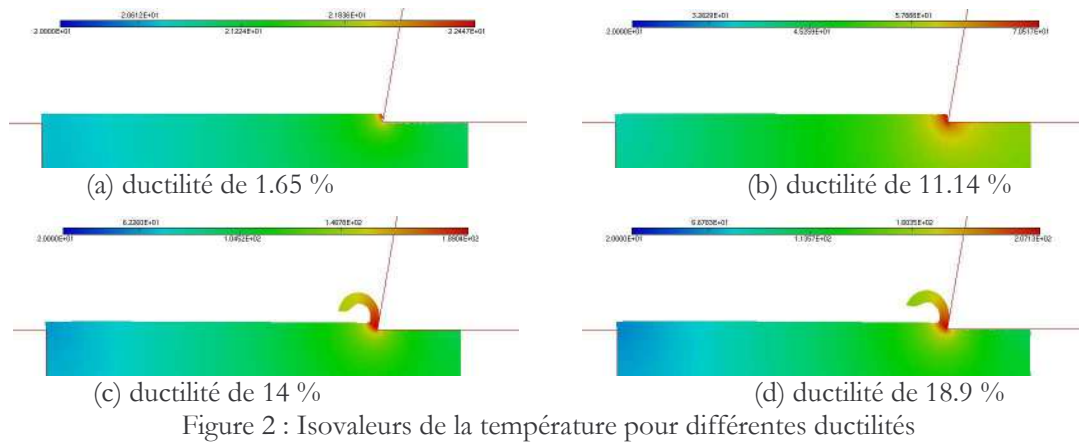


Figure 2 : Isovaleurs de la température pour différentes ductilités

Suivant la ductilité du matériau, la distribution de température est totalement différente. Plus la ductilité est grande plus la température est élevée dans le copeau comme on peut s’y attendre. La température passe de 207 °C pour matériau le plus ductile à 22.4 °C pour le matériau le moins ductile. On note également une forte segmentation du copeau pour le matériau le plus fragile que nous allons interpréter en détails. Concernant la formation et la segmentation du copeau, elle est bien décrite par le modèle, comme le montrent la Figure 3 et les suivantes. Pour le matériau le plus ductile (déformation à la rupture de 18.9 %), le copeau se forme, se propage, puis se segmente pour un déplacement de l’outil de 20.49 mm comme le montre la Figure 3 où l’on a reporté les distributions de la température (Figure 3 a), l’adaptation du maillage (Figure 3 b) ainsi que l’endommagement (Figure 3 c).

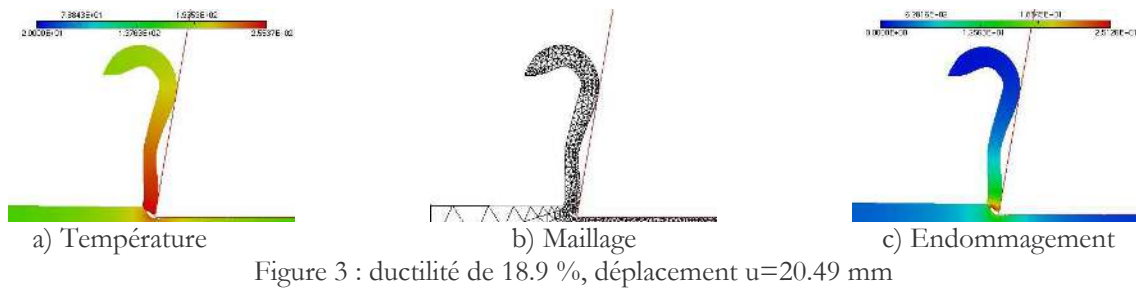


Figure 3 : ductilité de 18.9 %, déplacement $u=20.49$ mm

A cet instant le premier segment du copeau est formé et la température maximale est de 255 °C. Ce premier segment de copeau a alors une taille de 20.49 mm.

Pour le matériau ayant 14 % de ductilité, la situation est assez différente, comme le montrent les Figure 4 et Figure 5. Le copeau se forme et se segmente à une longueur de 15.29 mm (Figure 4).

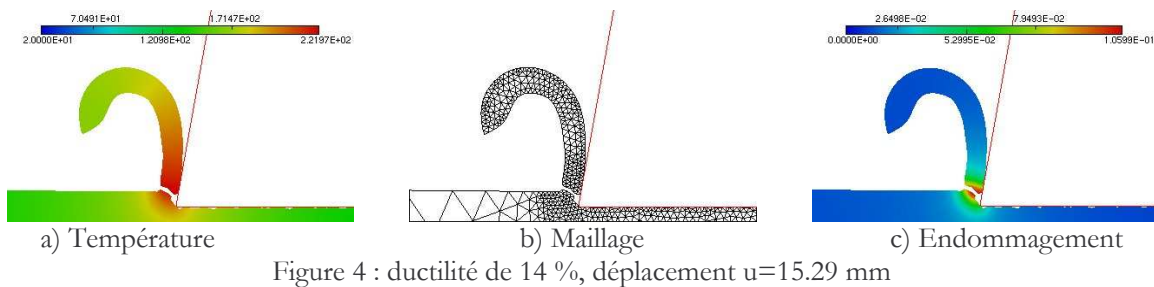


Figure 4 : ductilité de 14 %, déplacement $u=15.29$ mm

La température maximale à cet instant est de 222 °C. On note que la baisse de ductilité provoque une baisse de la longueur du premier fragment de copeau. Si on continue l’usinage, un deuxième copeau se forme et se segmente pour un déplacement de l’outil de 23.09 mm, donnant une longueur de ce deuxième fragment de copeau de 7.8 mm contre 15.29 mm pour le premier fragment. On note aussi l’existence de plusieurs fissures transversales sur ce deuxième fragment lui donnant ainsi une géométrie en dents de scie souvent

observée expérimentalement. Enfin notons que la température maximale à la formation du deuxième fragment est de 217 °C.

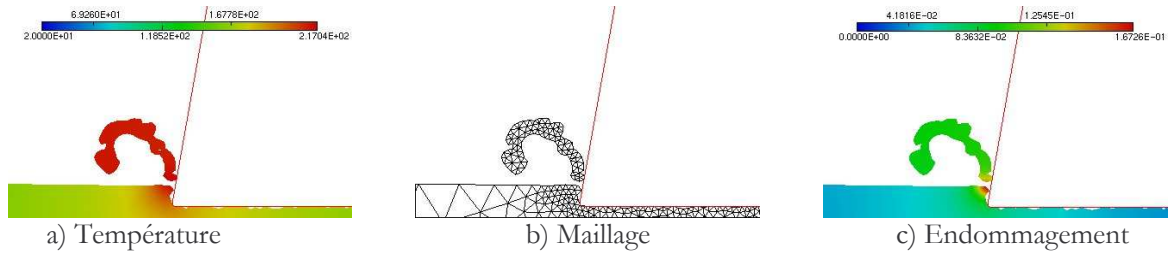


Figure 5 : ductilité de 14 %, déplacement $u=23.09$ mm

Pour le matériau à 11.14 % de ductilité, le premier fragment de copeau à une longueur de 4.74 mm et contient quelques fissures transversales comme on peut le voir sur la Figure 6.

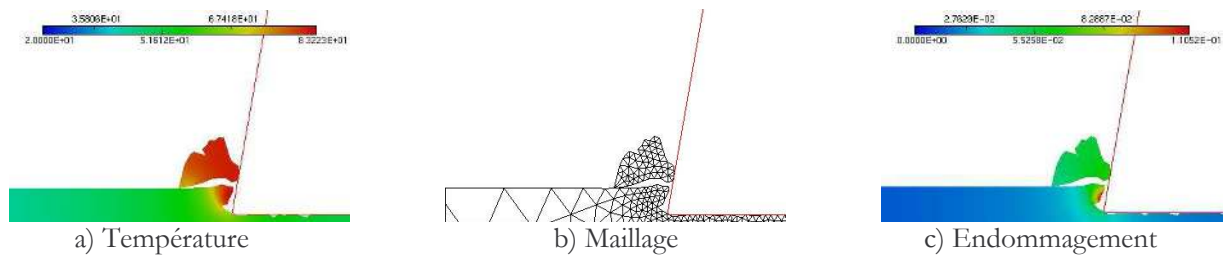


Figure 6 : ductilité de 11.14%, déplacement $u=4.74$ mm

Les fragments suivants ne sont mêmes plus visibles car leur longueur est inférieure à 1 mm et la taille du maillage ($h_{\min} = 0.2$ mm) ne permet plus de les visualiser. En effet, pour cela, il aurait fallu prendre un h_{\min} plus faible de l'ordre de 0.01 mm, mais cela nécessitait une nouvelle identification. Quant à la température maximale, elle est de l'ordre de 83.2 °C au moment de la formation du premier fragment.

Enfin, nous terminons par le matériau le moins ductile (déformation à la rupture de 1.65 %). Les fragments du copeau (y compris le premier) sont de l'ordre de 0.2 mm et il n'est pas possible de les visualiser pour les mêmes raisons que précédemment. De ce fait, la température maximale après un déplacement de l'outil de 4.99 mm est de l'ordre de 22.4 °C (Figure 2 a).

Pour conclure sur l'effet de la ductilité, on peut noter que plus le matériau est ductile plus la longueur du premier fragment de copeau est grande. On s'attend donc que, pour une ductilité suffisamment grande, le copeau ne se segmente jamais, donnant un copeau continu en forme de spirale conformément aux observations expérimentales. L'autre remarque est que les fragments de copeaux sont d'autant plus courts que leur nombre est élevé. L'ensemble de ces phénomènes captés par l'approche avec endommagement ne sont pas "captés" par l'approche sans endommagement.

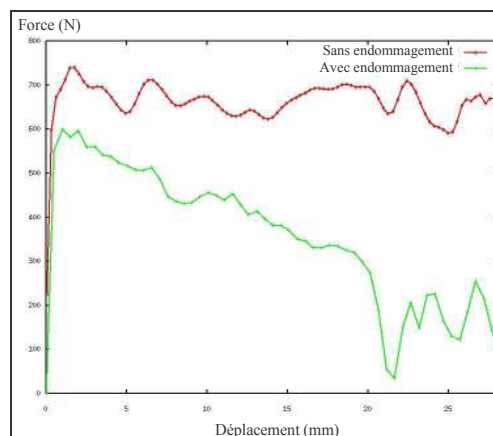


Figure 7 : Courbes Force/Déplacement avec ou sans endommagement

Sur la figure 7, nous comparons l'effort de coupe pour le matériau le plus ductile avec le calcul couplé (avec l'endommagement) et non couplé (sans endommagement). L'effort de coupe est nettement plus élevé avec l'approche sans endommagement, il est supérieur à 700 N contre 600 N dans l'approche avec endommagement. L'effort oscille autour d'une valeur constante tout le temps pour l'approche sans endommagement. Dans le cas avec endommagement, on note une chute de l'effort de 595 N à environ 320 N au moment de la fragmentation du premier copeau puis chute à 30 N lors de la séparation du premier fragment ($u=20.5$ mm) pour remonter immédiatement.

En conclusion, l'ensemble des résultats discutés ci-dessus montre que si la formation du copeau est modélisable avec ou sans endommagement, la segmentation du copeau n'est possible qu'avec l'approche tenant compte de l'endommagement ductile. De plus, cette dernière semble plus apte que l'approche sans endommagement à rendre compte de plusieurs phénomènes caractéristiques de la coupe par formation de copeaux ou d'autre type de coupe comme le refendage des tôles, l'estampage, le matriçage,

Une dernière comparaison entre ces deux approches consiste à pousser l'usinage jusqu'à la fin de la pièce afin d'examiner la séparation finale pièce-copeau. Pour cela, nous avons traité l'usinage d'une pièce de 10 mm de longueur en utilisant les mêmes conditions que ci-dessus en supposant un matériau à 14 % de ductilité. Dans les deux cas, on observe bien une formation de copeaux jusqu'au bout de la pièce (Figure 8).

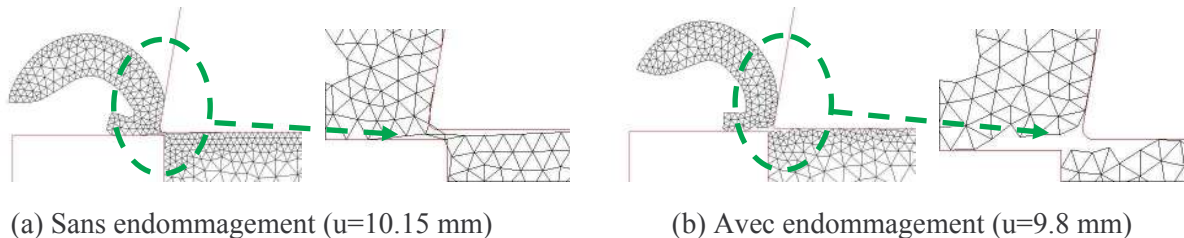
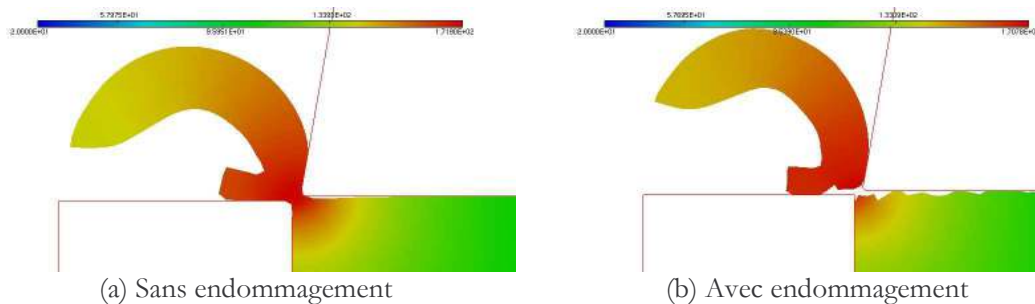
(a) Sans endommagement ($u=10.15$ mm)(b) Avec endommagement ($u=9.8$ mm)

Figure 8 : Maillage pour un calcul sans endommagement et pour un calcul avec endommagement

La principale différence se situe dans la séparation entre la pièce et le copeau. Pour l'approche couplée, la séparation finale pièce-copeau est bien décrite et se produit bien avant que l'outil n'arrive en fin de pièce (Figure 8 b), alors que pour l'approche sans endommagement, un ligament de matière demeure (Figure 8 a). Les fortes distorsions du maillage dans ce ligament provoquent l'arrêt du calcul. Sur le plan thermique, il n'y a pas de différence significative entre la distribution de la température dans les deux cas, comme le montre la Figure 9.



(a) Sans endommagement

(b) Avec endommagement

Figure 9 : Isovaleurs de la température pour un déplacement $u=9.8$ mm

3 Conclusion

En traitant l'exemple de la coupe orthogonale avec deux approches, l'une tenant compte de l'endommagement ductile et de son effet sur les autres champs thermo-mécanique (couplages forts) et l'autre négligeant totalement la notion d'endommagement, nous pouvons affirmer que :

- ✓ L'une et l'autre des méthodes permettent de simuler la formation du copeau.
- ✓ Seule l'approche avec endommagement rend compte naturellement et d'une manière réaliste de la segmentation du copeau.

- ✓ Seule l'approche avec endommagement modélise correctement la séparation copeau-pièce à la fin de l'usinage orthogonal.
- ✓ L'allure des courbes effort de coupe déplacement de l'outil est correctement décrite par l'approche avec endommagement.
- ✓ L'approche couplée traduit bien la fragmentation du copeau en fonction de la ductilité du matériau.
- ✓ L'influence des paramètres du procédé (vitesse de coupe, profondeur de passe,...) est qualitativement bien décrite par les deux approches.

Ceci semble indiquer que l'approche tenant compte du couplage comportement-endommagement possède d'intéressantes potentialités pour simuler numériquement la coupe par formation de copeaux. Ceci dit, trois aspects nous semblent importants à améliorer dans cette approche.

- La dépendance de la solution vis-à-vis de la finesse du maillage dans les zones endommagées. Cela nécessite l'utilisation d'une théorie non locale.
- Améliorer le couplage frottement-thermique afin que la chaleur générée par le frottement copeau-outil et pièce-outil soit prise en compte dans le bilan énergétique.
- Améliorer le modèle mécanique afin d'y inclure les "vrais" mécanismes physiques de formation du copeau. En particulier tenir compte des phénomènes métallurgiques (voir chimiques) se produisant à l'interface outil copeau afin de modéliser des phénomènes comme l'usure de l'outil, avec formation de cratères sur la face de coupe ou avec l'adhésion de copeaux à la surface de coupe ...

Ceci demande bien entendu de disposer de mesures expérimentales pertinentes qui ne semblent pas facilement disponibles à l'heure actuelle.

Références

- [1] Borouchaki, H., Laug, P., BL2D-V2 : mailleur bidimensionnel adaptatif, Rapport n° 0275 INRIA, 2003
- [2] Ceretti, E., Fallboehmer, P., Wu, W.T., Altan, T., "Simulation of high speed milling: application of 2D FEM to chip formation in orthogonal cutting", ERC NSM, Ohio State University, 1995.
- [3] Elhraiach, A., "Simulation numérique de la coupe orthogonale : Application à l'alliage d'aluminium AS7U3G.T5", D.E.A. , Université de Technologie de Troyes, 2003.
- [4] Firas, A., "Modélisation et simulation thermomécaniques de la coupe des métaux", Thèse de Doctorat, ENSAM, Paris, 2001.
- [5] Fourment, L., Bouchard, P. O., "Numerical simulation of chip formation and crack propagation during non-steady cutting processes.", International Journal of Forming processes (Modeling of Machining Operations), 3, no 1-2, pp. 59-76, , 2000.
- [6] Kim, J.D., Marinov, V.R., Kim, D.S., "Built-up edge analysis of orthogonal cutting by the visco-plastic finite element method", J. Mat. Proc. Tech., 71, pp. 367-372, 1997.
- [7] Komvopoulos, K., Erpenbeck, S.A., "Finite element modeling of orthogonal metal cutting", Trans.ASME, J. Eng. For. Ind., 113, pp. 253-267, 1991.
- [8] Lemaitre, J., and Chaboche J.L., Mécanique des Matériaux Solides, Dunod, 1985.
- [9] Lestriez, P., "Modélisation numérique du couplage thermo-mécanique-endommagement en transformations finies. Application à la mise en forme", Thèse de Doctorat, UTT, Troyes, 2003.
- [10] Lin, Z.C., Lin S.Y., "A coupled finite element model of thermo-elastic-plastic large deformation for orthogonal cutting", J. Eng. Mat. Tech., 114, pp. 218-226, 1992.
- [11] Mamalis, A.G., Horvath, M., Branis, A.S., Manolacos, D.E., "Finite element simulation of chip formation in orthogonal metal cutting", J. Mat. Proc. Techn. , 110, pp. 19-27, 2001.
- [12] Rakotomalala, R., Joyot, P. and Touratier, M., "Communication in numerical methods in engineering", 9, pp. 975-987, 1993.
- [13] Saanouni K., Chaboche J.L., "Computational Damage Mechanics. Application to Metal Forming", Chapter 7 of the Volume 3 : "Numerical and Computational methods" (Editors: R. de Borst, H. A. Mang), in "Comprehensive Structural Integrity", Edited by I. Milne, R.O. Ritchie and B. Karihaloo, ISBN: 0-08-043749-4, 2003.