

MODELISATION NUMERIQUE DE LA COUPE ORTHOGONALE EN UGV

J. Limido, C. Espinosa

Département Génie Mécanique, ENSICA

1, Place Emile Blouin 31056 TOULOUSE Cedex 5

Téléphone : +33(0)5 6161 8754

Télécopie : +33(0)5 6161 8595

jlimido@ensica.fr, christine.espinosa@ensica.fr

Mots clés : Modélisation, UGV, Coupe Orthogonale, Smoothed Particle Hydrodynamics, Acier 38NCD6

1. INTRODUCTION

L'usinage par enlèvement de matière est le procédé le plus utilisé dans la production de composants pour l'industrie mécanique. AIRBUS France utilise l'usinage mécanique par outils coupants sur de nombreuses pièces sollicitées en fatigue. Ce procédé tend à évoluer vers l'Usinage Grande Vitesse (UGV) car il permet d'améliorer sensiblement la productivité.

Les caractéristiques finales de l'état de surface des pièces usinées sont un élément prépondérant pour l'intégrité des pièces et sont fortement liées au procédé de fabrication. Il est donc nécessaire d'optimiser les paramètres d'usinage pour optimiser la qualité de production et la productivité.

Dans le cadre d'un programme de recherche commun avec AIRBUS France, des recherches expérimentales et numériques sont engagées par le D.G.M. de l'E.N.S.I.C.A. pour étudier le processus de chargement des pièces pendant et après l'usinage dans le but de déterminer une relation entre les paramètres d'usinage (vitesse de coupe, profondeur de passe, etc.), et la tenue en fatigue.

L'objectif de l'étude présentée ici est de réaliser des simulations numériques du procédé d'usinage en faisant varier certains paramètres, afin d'obtenir un modèle fidèle de la sollicitation vue par la pièce et d'évaluer la pertinence et les limites de l'outil numérique choisi. L'intérêt est aussi d'obtenir une meilleure transparence de résultats par rapport à l'utilisation de codes industriels dédiés à l'usinage (type Advantedge), codes ne permettant pas la maîtrise de tous les paramètres d'entrée et de sortie.

Les simulations numériques sont menées à l'aide du code hydrodynamique de calcul non linéaire par éléments finis LS-DYNA en utilisant la méthode Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 2D dans le cadre de la coupe orthogonale.

La validation des modèles numériques est effectuée sur la base de la comparaison avec des résultats expérimentaux collectés dans la littérature. Les trois critères retenus sont la morphologie de copeaux, la répartition de contrainte et les efforts de coupe.

2. PROBLEMATIQUE DE L'USINAGE GRANDE VITESSE

L'usinage par enlèvement de matière est une technique très répandue qui trouve des applications dans de multiples secteurs d'activités (Aéronautique, Automobile, etc.). Elle fait encore aujourd'hui l'objet de nombreuses études. En effet, les phénomènes physiques mis en jeu lors de l'usinage sont encore très mal maîtrisés.

Avant de présenter une nouvelle étude de la coupe, nous proposons dans cette partie de définir le cadre choisi, ainsi que la terminologie associée afin d'introduire de façon rapide les phénomènes physiques intervenant lors de la coupe, ce qui nous permettra de mieux cerner les intérêts et contraintes scientifiques et industriels.

2.1 Cadre de l'étude : la coupe orthogonale

On parle de coupe orthogonale lorsque l'arête de coupe est rectiligne, perpendiculaire au vecteur vitesse d'écoulement de la matière en chaque point, et perpendiculaire au mouvement d'avance de l'outil. Les conditions de coupe se résument à la vitesse de coupe et à l'avance par tour.

Expérimentalement, on rencontre deux cas classiques de coupe orthogonale en tournage : L'usinage de tube en bout et l'usinage de palier (Cf. figure 1).

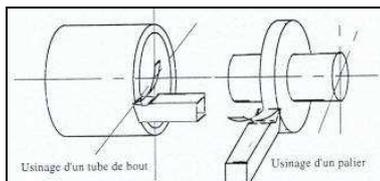


Figure 1: Cas de tournage orthogonal

Lorsque l'épaisseur du copeau reste faible devant sa largeur, la coupe orthogonale permet de se rapporter à un problème bidimensionnel. En effet, exceptés les effets de bords, tous les phénomènes mis en jeu dans les plans perpendiculaires à l'arête de coupe sont identiques. Le problème se ramène donc à un cas de déformation plane.

2.2 Phénomènes physiques mis en jeu lors de l'usinage

- Mécanisme de formation du copeau :

Dans le cadre de la coupe orthogonale en régime stationnaire, l'interaction outil/pièce et le processus de génération du copeau peuvent se représenter de façon simple (Cf. figure 2).

Lors de la coupe, trois zones principales de cisaillement apparaissent: la zone primaire (cisaillement causant la formation du copeau), la zone secondaire (cisaillement dû au frottement outil/copeau), zone tertiaire (cisaillement dû au frottement outil/pièce)

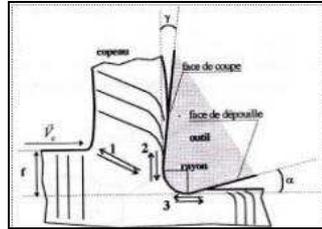


Figure 2: Zones de cisaillement

L'outil en avançant, appuie sur le copeau et génère un cisaillement (cisaillement primaire) entre la pointe d'outil et la surface de la pièce. Les zones de cisaillement sont le théâtre de très fortes déformations plastiques et très grandes vitesses de déformations. Cela engendre localement une importante production de chaleur se dissipant dans le copeau, l'outil et la pièce.

- Discontinuité et instabilité de coupe :

Le cisaillement que subit la matière à la traversée de la zone primaire n'est pas forcément stable et continu.

Selon les conditions de coupe, on rencontre trois familles de copeaux :

Copeau continu: la continuité du matériau y est préservée, et les déformations plastiques dans les zones de cisaillement sont quasi stationnaires.

Copeau segmenté: il est composé d'éléments plus ou moins connectés entre eux, résultant de variations périodiques de la couche superficielle ; ce qui conduit à des zones alternées de déformations locales très peu cisailées.

Copeau dentelé: il est en majorité formé d'éléments séparés, plutôt dus à une rupture.

La présentation rapide des phénomènes physiques intervenant lors de la coupe des métaux permet de mettre en exergue la complexité de l'étude de l'usinage : grandes déformations, grandes vitesses de déformations, instabilités mécaniques, couplage thermo-mécanique.

3. MODELISATION NUMERIQUE DE LA COUPE: L'APPROCHE "SPH"

La bibliographie permet de définir les limitations des modèles éléments finis en formulation Lagrangienne (écrasante majorité des développements actuels) et notamment les problèmes de séparation pièce/copeau (Bil 2004). Nous nous attacherons dans cette partie à présenter une approche différente de la modélisation de la coupe. Les modèles développés mettent en œuvre de la méthode Smoothed Particles Hydrodynamics. Les modèles sont développés dans le cadre 2D de la coupe orthogonale.

3.1 La méthode "Smoothed Particles Hydrodynamics" (SPH)

L'approche la plus communément utilisée pour résoudre le problème de la modélisation de la coupe est la méthode des élément-finis lagrangiens avec remaillage adaptatif. Il existe aussi un mode couplé Lagrangien/Eulérien nommé ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian) qui peut être applicable dans l'étude de la coupe.

Ces types de modélisations sont mis en œuvre car l'usinage engendre des grandes déformations, des grandes rotations et des grands déplacements.

Une nouvelle méthode Lagrangienne de discrétisation spatiale adaptée à ce type de problème est apparue dans les années 70: la méthode SPH ou Smoothed Particle Hydrodynamics.

Dans le cas des codes utilisant la méthode SPH, les lois de comportement des matériaux sont les mêmes que pour les méthodes classiques d'éléments finis. Très peu de transformations des algorithmes de calculs sont nécessaires en ce qui concerne la formulation mathématique de la résistance des matériaux. L'une des différences concerne la discrétisation en masse: au lieu d'avoir des nœuds et des éléments reliant ces nœuds, cette méthode utilise des points auxquels sont affectées des masses fixées (particules), particules qui interagissent suivant des fonctions d'interpolations dans une sphère d'influence (Cf. figure 3).

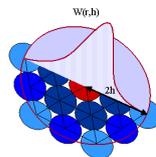


Figure 3: fonction d'interpolation et sphère d'influence

3.2 Modèles numériques de coupe d'Acier haute résistance

Une étude bibliographique a permis de déterminer deux cas de comparaisons numérique/expérimental en coupe orthogonale. Ces cas sont issus d'une présentation de congrès CIRP (Mabrouki 2004) dans laquelle une comparaison résultats Advantedge/Abaqus/Expérimentaux est présentée. Les paramètres expérimentaux retenus sont définis dans le tableau suivant.

PIECE	Matériau		Acier 38NCD6 (AISI 4340)
OUTIL	Matériau		Carbure de Tungstène
	Angle de coupe		5°
	Angle de dépouille		5°
	Rayon de courbure (r)		25 µm
PARAMETRES DE COUPE	Vitesse de coupe (Vc)		120 m/min
	Avance (f)	Cas 1	224µm
		Cas 2	400µm

Advantedge est un logiciel de calcul spécialement dédié à la modélisation de l'usinage. L'utilisateur a accès à un nombre limité de paramètres du modèle. Il est basé sur une formulation éléments finis lagrangienne explicite avec remaillage adaptatif intégré et modèle de comportement visco-thermo-élasto-plastique. L'atout majeur de ce code est que la modélisation est simplifiée pour l'utilisateur. Il permet également de produire des copeaux discontinus.

Abaqus est un code élément fini industriel. Mabrouki (2004) donne peu de précisions sur le modèle dans sa présentation. Le modèle SPH mis au point avec LS-DYNA est basé sur l'utilisation d'un modèle de comportement de type Johnson Cook permettant la prise en compte des effets élasto-plastiques, visqueux et thermiques sur l'écoulement plastique, conditions nécessaires pour l'étude de l'usinage. Les paramètres du modèle Johnson Cook pour l'acier 38NCD6 sont issus de la littérature (Mabrouki 2004). La méthode SPH ne nécessite pas d'algorithme de gestion du contact. Le contact entre deux particules existe automatiquement lorsqu'une particule entre dans la sphère d'influence d'une de ses voisines (car l'outil dans le modèle réalisé est également maillé en particules). Le tableau suivant présente les différentes approches des modèles.

	ADVANTEDGE	ABAQUS	LS-DYNA SPH
Séparation du copeau	Remaillage	Remaillage	Ecartement des particules
Formulation	Explicite	Implicite	Explicite
Modèle de frottement	Coulomb	Coulomb	Lié à la méthode
Modèle de matériaux	Formule analytique	Courbes expérimentales (vitesse de déformations faibles) extrapolées	Johnson Cook
Type d'éléments	Triangles quadratiques 6 noeuds	Quadrilatères quadratiques 4 noeuds	SPH

3.3 Résultats

Les critères de comparaison des modèles sont la morphologie de copeau, l'état de contrainte et les efforts de coupe.

3.3.1 Morphologie de copeau et état de contrainte:

- Cas Avance = 224µm

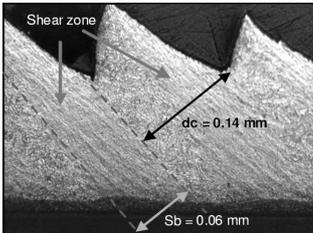


Figure 4 : Résultat expérimental $f=224\mu\text{m}$ (Mabrouki 2004)

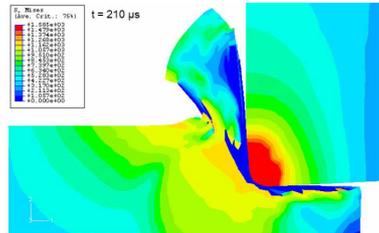


Figure 5 : Résultat ABAQUS $f=224\mu\text{m}$ (Mabrouki 2004)

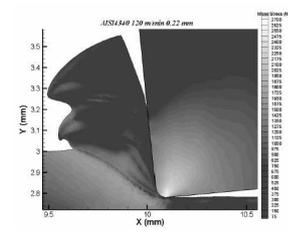


Figure 6 : Résultat ADVANTEDGE $f=224\mu\text{m}$ (Mabrouki 2004)

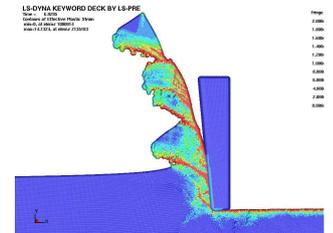


Figure 7 : Résultat LS-DYNA $f=224\mu\text{m}$

- Cas Avance = 400µm

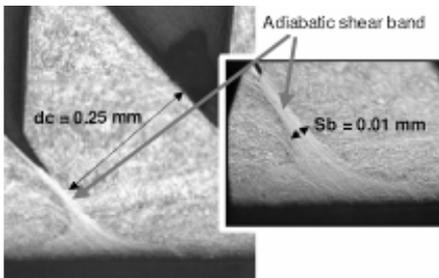


Figure 8 : Résultat expérimental $f=400\mu\text{m}$ (Mabrouki 2004)

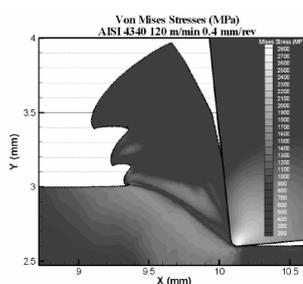


Figure 9 : Résultat ADVANTEDGE $f=400\mu\text{m}$ (Mabrouki 2004)

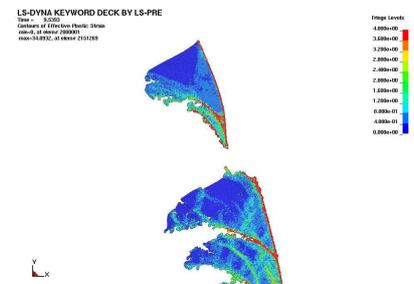


Figure 10 : Résultat LS-DYNA $f=400\mu\text{m}$

Expérimentalement, on observe (Cf. figure 4 et figure 8) un rétrécissement de la largeur de la bande de cisaillement (notée Sb) pour des avances (f) croissantes. En effet, le cas $f=400\mu\text{m}$ correspond à un régime de coupe de transition entre copeaux dentelés et segmentés (discontinus). Pour des avances supérieures à $500\mu\text{m}$, la formation de copeaux dentelés totalement discontinus est obtenue.

ADVANTEDGE donne de bons résultats dans le cas $f=224\mu\text{m}$, mais prédit un copeau faiblement dentelé (pas d'amorce de rupture) dans le cas $f=400\mu\text{m}$ alors qu'il est en réalité très fortement dentelé.

Le résultat ABAQUS est moins bon (le cas ABAQUS $f=400\mu\text{m}$ n'est pas présenté dans les travaux de Mabrouki (2004)). On peut penser que ceci est dû à des problèmes de déformation de maillage au vu du résultat présenté figure 5.

Les modèles LS-DYNA SPH donnent des résultats cohérents dans les deux cas présentés. On peut notamment constater la bonne représentation de l'amorce de rupture en fond de dents du copeau dans le cas $f=400\mu\text{m}$. Le modèle SPH représente bien cette concentration de contrainte dans les bandes de cisaillement conduisant au rétrécissement de celle-ci et à l'apparition de ruptures (Cf. figure 7 et figure 10). De plus, la périodicité et l'épaisseur de ces bandes de cisaillement sont correctement estimées (environ 5% d'erreur). Il est important de préciser que ces résultats ont été obtenus sans aucun ajustement des paramètres du modèle de matériaux.

La morphologie de copeau est donc prédite avec une précision plus importante par le modèle LS-DYNA SPH que par les modèles ABAQUS et ADVANTEDGE.

3.3.2 Efforts de coupe:

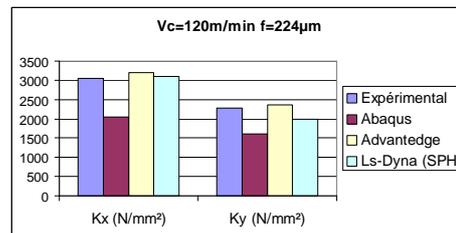


Figure 11: Comparaison des efforts de coupe spécifiques

L'estimation des efforts de coupe est un critère de validation classique dans la modélisation de l'usinage. En effet, il permet de valider la pertinence de la représentation du frottement dans le modèle (sous réserve que la bonne morphologie de copeau soit représentée). Dans les modèles « éléments finis classiques » (ADVANTEDGE, ABAQUS), les efforts de coupe sont souvent recalés après ajustement du coefficient de frottement. Pour indication les valeurs du coefficient de frottement peuvent varier de 0.05 à 0.9 afin d'obtenir les efforts de coupe corrects.

Le modèle ABAQUS sous estime (environ 30% d'erreur) les efforts de coupe spécifiques tangentiels (Kx) et normaux (Ky). ADVANTEDGE évalue précisément les efforts de coupe (environ 10% d'erreur) grâce à un coefficient de frottement ajusté et à une prédiction réaliste de la morphologie du copeau (ce n'est pas toujours le cas comme l'a montré Irander (2004) dans ses travaux).

Le modèle LS-DYNA SPH réalisé permet d'estimer les efforts de coupe tangentiels (Kx) et normaux (Ky) avec respectivement environ 5% et 12 % d'erreur. Le modèle SPH est donc validé. Il est important de préciser que les résultats SPH ont été obtenus sans ajustement de paramètres de frottement et donc sans recalages par rapport aux efforts.

4. BILAN

Les résultats des modèles SPH développés ont été comparés avec des cas de comparaisons Expérimental / ABAQUS / ADVANTEDGE. Les critères de validation définis ont été la morphologie du copeau, l'état de contraintes et les efforts de coupe. Cette étude a permis de démontrer la pertinence de l'outil numérique choisi : bonne prédiction de la morphologie du copeau, états de contraintes cohérents et estimation correcte des efforts de coupe (environ 15% d'erreur par rapport aux essais). Les avantages de la mise au point d'un tel modèle, qui pour l'instant donne des résultats comparables aux codes dédiés à l'usinage (ADVANTEDGE par exemple), sont la totale transparence par rapport aux paramètres et hypothèses faites et l'utilisation de paramètres numériques non recalés.

Les prolongements naturels de cette étude sont le passage à une modélisation 3D en vue de traiter des problèmes de coupe oblique et des recherches plus spécifiques sur la gestion des surfaces libres et des échanges thermiques en SPH.

REMERCIEMENTS

Cette étude a été réalisée dans le cadre d'un programme de recherche commun avec AIRBUS France.

REFERENCES

- Bil H., S. Engin, et A. Erman Tekkaya, "A comparison of orthogonal cutting data from experiments with three different finite element models", Int. Journal of Machine Tools and manufacture, (2004).
 Irander C.G., "Verifying av simuleringsdata", thesis, Lahue Tekniska Universitet, (2004)
 Mabrouki T., "Material modelling and experimental study of serrated chip morphology", 7th CIRP, (2004).