

## 1.8 Modélisation numérique de la coupe

Au cours de ces 30 dernières années, des modèles numériques utilisant la méthode des éléments finis ont été utilisés dans le cadre de la modélisation de la coupe des métaux. En effet, l'industrie et le monde scientifique, pour essayer de comprendre, de modéliser et de quantifier les phénomènes présents dans ces procédés, ont fortement encouragé ces développements. En comparaison avec les modèles analytiques, les modèles numériques s'attachent à fournir une approche globale du procédé et s'appuient essentiellement sur des hypothèses physiques macroscopiques. De plus, une fois leurs résultats validés, les modèles numériques donnent des résultats plus complets comme les champs de déformation, de contraintes ou de température au sein du matériau usiné et parfois de l'outil. Mais jusqu'à maintenant ces modèles numériques s'attachent essentiellement, face à la complexité des phénomènes mis en jeu lors de la coupe, à modéliser la coupe orthogonale ou oblique. Et les procédés comme le fraisage ou le perçage ne sont pas encore largement envisagés. Les modèles numériques s'appuient essentiellement sur trois configurations lagrangienne, eulérienne et récemment arbitraire lagrangienne eulérienne. Des approches plus récentes basées sur des méthodes de type éléments naturels, méthode particulaire ou méthode sans maillage sont pour l'instant isolées mais prometteuses vis à vis des possibilités qu'elles offrent pour l'usinage. Naturellement les modèles numériques des procédés de coupe ou des procédés spécifiques d'usinage se sont tout de suite tournés vers des problématiques directement liées au contrôle du procédé : comme l'effet de la géométrie des outils et des paramètres de réglages des procédés, la connaissance des comportements thermiques à l'interface, l'évaluation des contraintes résiduelles, l'observation de l'usure des outils, ainsi que des problématiques plus phénoménologiques comme les analyses dynamiques, ou les mécanismes de formation du copeau.

### 1.8.1 Enlèvement de matière et procédés de coupe en général

L'étude numérique des procédés de coupe est un problème très vaste et très complexe, car les opérations d'enlèvement de matière impliquent de nombreux paramètres initiaux :

- Les paramètres matériaux (type, structure moléculaire ou cristalline, sa température initiale ou son état initial).
- Les paramètres de l'outil de coupe (géométrie, matériau et revêtement).
- Les paramètres de coupe identifiables via les réglages du procédé (la vitesse de coupe, l'avance, les profondeurs de passe, la lubrification, voire l'environnement de travail).

Beaucoup de travaux scientifiques se sont attachés à décrire l'influence de quelques uns de ces paramètres de façon isolée. Mais la complexité de certains procédés possédant un grand nombre de paramètres couplés et mettant en jeu des phénomènes physiques

---

méconnus ne permet pas de mener des études isolées de certains paramètres. Donc comme pour les modèles analytiques, les cas basiques les plus courants sont la coupe orthogonale et la coupe oblique. En effet, les modèles de coupe élémentaire ont été essentiellement étudiés car ils sont plus faciles à simuler, ils permettent d'appréhender plus facilement la mécanique physique des procédés d'usinage, de façon à se rapprocher comme dans les approches analytiques de certains procédés plus complexes. Certains développements ont été menés sur des procédés spécifiques, mais peu de travaux ont été menés sur le fraisage qui est pourtant l'un des procédés les plus répandus dans l'industrie.

Les premiers modèles étudiés concernent la coupe orthogonale (*Kim et Sin, 1996*)[36] et (*Ozel et Altan, 1998*)[37]. Certains se sont aussi intéressés aux conditions d'usinage à grande vitesse comme (*Marusich et Ortiz, 1995*)[38].

Plus tard sont apparus les premiers modèles par éléments finis de coupe orthogonale ou oblique en 3D. L'intérêt de la modélisation volumique permet principalement d'étudier la coupe oblique et ses spécificités comme par exemple dans les travaux de (*Ceretti et al., 2000*)[39].

Dans le même temps des modèles sont apparus utilisant des formulations couplées lagrangienne eulérienne (*Movahhedy et al., 2000*)[40], permettant de s'affranchir de la nécessité d'avoir un paramètre de rupture des éléments dans les modèles lagrangiens et d'éviter le comportement visqueux des modèles eulériens, mais qui pose tout de même des questions au niveau des contraintes à l'interface outil-copeau.

Un peu plus tard, un logiciel explicite pour la simulation des grandes déformations a été proposé par (*Ali et Lorong, 2002*)[41]. Ces travaux constituent une première composante d'un logiciel inclus dans une plateforme orientée recherche nommé Nussy. Ils utilisent une approche thermo-élasto-visco-plastique des matériaux, une description du contact basée sur la méthode de pénalisation, et une procédure de remaillage basée sur une approche topologique pour la discrétisation de la géométrie. Cette plateforme a été complétée grâce aux approches C-NEM développées notamment dans le cadre du projet PGV. La même année des simulations sur des cas industriels ont été mises au point à l'aide de logiciel commerciaux comme Abaqus® ou Deform® dans les travaux de (*Klocke et al., 2002*)[42] et (*Shi et al., 2002*)[43].

En 2004, les progrès réalisés dans les logiciels ont permis de voir apparaître des modèles 3D de la coupe orthogonale ou oblique comme par exemple dans les travaux de (*Soo et al., 2004*)[44] développés à l'aide d'Abaqus/Explicit®.

Certains auteurs se sont aussi intéressés au domaine du micro usinage, ou plus exactement de la coupe orthogonale à une échelle réduite afin de mieux comprendre la physique de la coupe et de comprendre les effets de la réduction d'échelle, les travaux de (*Kim et al., 1999*)[45], (*Rusnaldy et al., 2007*)[46] et (*Woon et al., 2007*)[47] peuvent notamment être cités.

---



### 1.8.2 Effets des géométries et des paramètres du procédé

Dans toutes les opérations d'usinage, il est nécessaire de sélectionner les conditions initiales de la coupe. La géométrie de l'outil, son matériau constitutif ou le revêtement utilisé ainsi que les paramètres d'usinage tels que la vitesse de coupe, l'avance et les profondeurs de passe décrivent tous des paramètres initiaux d'une opération d'usinage classique. L'essentiel des travaux dans ces thématiques s'attachent à étudier l'influence des variables d'entrées du procédé sur son comportement (qualité, productivité ou réduction des coûts). L'objectif principal est de reproduire l'influence des paramètres dans les modèles par éléments finis en s'appuyant sur un critère expérimental, afin d'obtenir des informations supplémentaires sur les effets de la géométrie et des paramètres au cours du procédé d'usinage.

Une étude sur l'angle de coupe de l'outil a été menée par *(Lo, 2000)*[48] en utilisant une modélisation lagrangienne de la coupe orthogonale d'un alliage de cuivre (OFHC) en condition de micro-usinage, une séparation géométrique des éléments étant introduite au préalable dans le modèle. Il montre dans ses travaux la diminution des efforts de coupe et de la contrainte maximale, avec l'augmentation de l'angle de coupe. Il observe aussi les contraintes résiduelles mais l'effet n'est pas réellement significatif.

Certaines explorations ont aussi été réalisées sur les différentes modélisations des géométries d'outils. Elles considèrent alors des outils parfaitement tranchants constituant une hypothèse forte, aux outils plus réalistes possédant des rayons plus ou moins importants, en passant par des géométries chanfreinées simulant l'usure ou des préparations d'arêtes spéciales. Un modèle arbitraire lagrangien eulérien de coupe orthogonale simulant un procédé de formation de copeau continu a été réalisé par *(Movahhedy et al., 2002)*[14] pour étudier différents outils chanfreinés. (voir figure 1.32 et figure 1.33) Les travaux de *(Yen et al., 2004)*[13] font écho aux précédents et proposent différentes géométries d'arêtes d'outils en coupe orthogonale. Ici la configuration utilisée est 2D lagrangienne avec une loi thermo-viscoplastique. Les auteurs tentent de relier ces modifications aux différentes observations réalisables sur la simulation comme par exemple le mode de formation du copeau, les efforts de coupe, et les variables physiques comme la température, les champs de contraintes ou de déformations.

L'objectif ultime de ces approches est de pouvoir obtenir une méthodologie fiable d'optimisation du procédé. Les travaux de *(Masillamani et Chessa, 2002)*[49] ont montré la faisabilité d'une telle approche par une première méthode statistique simple (plans d'expériences de type Taguchi). Les auteurs ont développé des simulations 3D de la coupe orthogonale d'un alliage d'aluminium 6061-T6 avec le logiciel LS-Dyna. Ils font varier les paramètres tels que l'angle de coupe, la vitesse de coupe et la profondeur de coupe, afin de déterminer l'influence des paramètres sur les données observables de façon à pouvoir déterminer un triplet optimum de conditions de coupe.

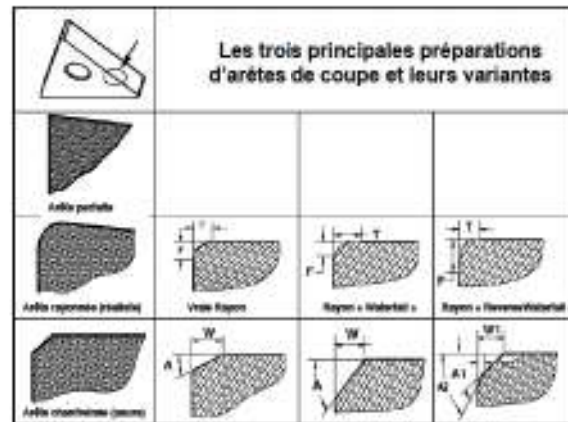


FIG. 1.32 – Différents profils de plaquettes utilisés pour les opérations de tournage. (Yen et al., 2004)[13]

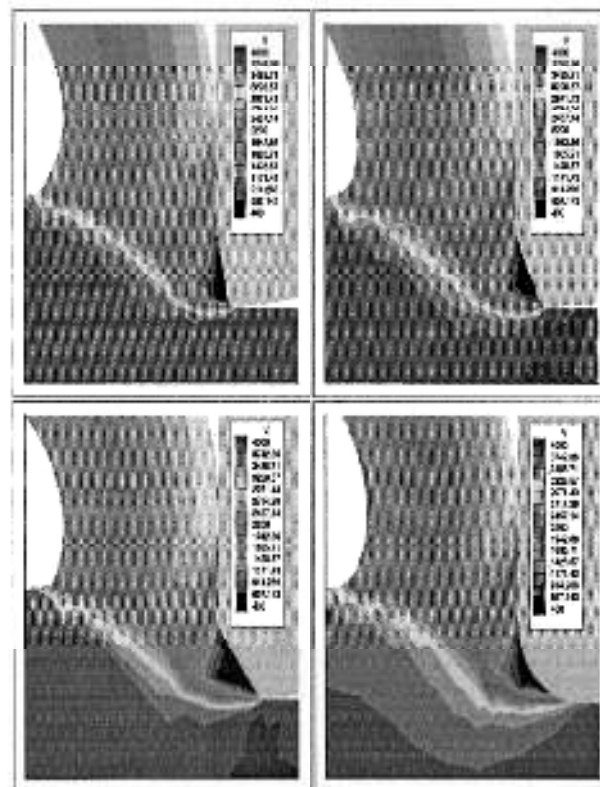


FIG. 1.33 – Champs des vitesses obtenus en coupe orthogonale avec différentes géométries d'outils : trois outils chanfreinés avec différents angles ( $10^\circ$ ,  $25^\circ$ ,  $35^\circ$ ) et un outil possédant un rayon de  $75 \mu\text{m}$ . (Movahhedy et al., 2002)[14]



### 1.8.3 Aspects thermiques en usinage

L'influence de la température joue un rôle très important dans les procédés d'usinage. Elle facilite la coupe en adoucissant le matériau mais limite les plages d'utilisation en dégradant la durée de vie des outils et en sollicitant les pièces usinées. De nombreuses techniques expérimentales ou numériques ont été développées pour étudier les échauffements dus à la coupe et les distributions de température présents sur l'outil ou dans la pièce. De plus le rôle de la température devient de plus en plus important dans les procédés à grandes vitesses, en micro fabrication et dans l'usinage de nouveaux matériaux comme les céramiques. Dans ce domaine, les travaux s'intéressent à l'analyse thermomécanique de la coupe orthogonale, aux champs de température présents dans la pièce et les outils, ou les perturbations que la température peut induire au cours de certaines opérations.

L'intérêt de ces approches est majeur pour une utilisation maîtrisée des procédés. En effet, les travaux de (*Wang et al., 1996*)[50] ont tenté d'appréhender le champ de température dans la dent d'une fraise pour une opération donnée. Une étude théorique de la thermique et une méthode expérimentale ont été mises en place pour identifier la répartition des champs de température. Ces efforts ont permis aux auteurs de mettre en évidence une variation cyclique de la température dans l'outil induisant une fatigue du matériau pouvant conduire à la rupture.

Plus tard (*Ramesh et al., 1999*)[51] ont mis en place un modèle par la méthode des éléments finis pour étudier les transferts de chaleur durant l'usinage. L'objectif étant de pouvoir prédire le profil de température à l'interface outil-copeau à partir de données d'efforts de coupe provenant d'essais expérimentaux ou de modèles empiriques de la coupe. Une fois le modèle recalé, les résultats corroborent les conclusions des recherches analytiques, c'est à dire que l'avance et la vitesse de coupe sont des paramètres très influents sur la température alors que l'effet de la profondeur de passe est marginal. Dans la même optique (*Ng et al., 1999*)[52] ont réalisé des simulations de coupe orthogonale avec le logiciel FORGE 2©, permettant d'obtenir les températures et les efforts. Pour recaler leur modèle, un dynamomètre Kistler a été utilisée pour mesurer les efforts de coupe en tournage sur un acier H13 et une mesure par caméra thermique a été utilisée pour déterminer la température dans le copeau. Malgré les hypothèses très simples du modèle, une bonne corrélation sur la température est obtenue. En revanche le modèle sous-estime les efforts de coupe.

Plus récemment (*Umbrello et al., 2007*)[53] ont proposé dans leurs travaux l'évaluation d'un coefficient global de transfert thermique à l'interface outil-copeau en coupe orthogonale. Un modèle par éléments finis du procédé a été réalisé avec une approche lagrangienne eulérienne arbitraire à l'aide du logiciel Deform 2D©. Les expériences sont menées à l'aide d'outils de tournage équipés d'un thermocouple pour mesurer la répartition thermique dans l'outil afin d'identifier par méthode inverse le coefficient global. Ensuite le coefficient prend place dans une modélisation de la thermique à l'interface outil-copeau, permettant ainsi de recaler à l'aide d'un seul paramètre l'effet de ces échanges dans le modèle

par éléments finis et d'obtenir une bonne corrélation avec l'expérience. La même année, (Umbrello et al., 2007)[15] proposent les résultats d'une approche purement thermique s'appuyant au préalable sur le calcul du flux thermique à une approche thermomécanique purement lagrangienne. L'auteur présente les avantages et inconvénients des deux approches. Il conclut sur le besoin d'une nouvelle approche de la thermique dans les modèles par éléments finis combinant les états stationnaires et transitoires nécessaires à la bonne modélisation du phénomène de la coupe. (voir figure 1.34)

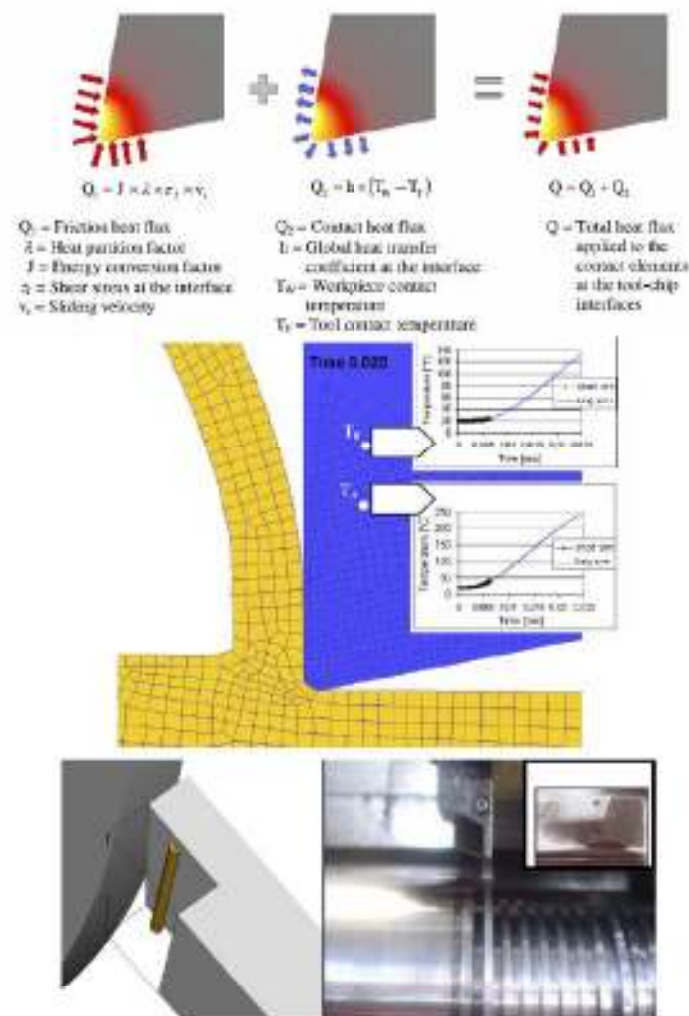


FIG. 1.34 – Prédiction et validation expérimentale à l'aide de thermocouples en coupe orthogonale des phénomènes thermiques à l'interface outil/copeau. (Umbrello et al., 2007)[15]



### 1.8.4 Mécanismes de formation du copeau

Les procédés d'enlèvement de matière ont tous un point commun, la formation du copeau. Son mode de création a été longuement étudié pour définir les mécanismes de formation, de segmentation et d'écoulement. Pour les deux premiers mécanismes, les paramètres procédés comme la géométrie d'outil et les conditions de coupe ont été étudiés. L'étude de l'écoulement est plus complexe, car le mouvement du copeau le long de l'arête de coupe de l'outil joue un rôle très important dans la conduction thermique du phénomène de coupe. En effet, en usinage et encore plus en usinage à grande vitesse, la quasi-totalité de la chaleur créée est évacuée dans le copeau. Cet aspect concerne plus spécifiquement les procédés comme le tournage, le perçage ou le fraisage.

Les difficultés scientifiques de cette thématique sont nombreuses et importantes, car le modèle doit prendre en compte un contact sévère et le matériau usiné est soumis à de grandes déformations plastiques. Le frottement, la compression et la viscosité doivent aussi être considérés. En ce sens plusieurs formulations sont proposées dans les modèles : les lagrangiennes avec critère de séparation, les eulériennes avec un comportement de type fluide et plus récemment les arbitraires lagrangiennes eulériennes.

Les premiers modèles 2D de coupe orthogonale disponibles dans la littérature et abordant les sujets de l'étude du copeau et de sa segmentation ont été développés par (*Shinozuka et al., 1996*)[54], (*Ceretti et al., 1996*)[55] et (*Mamalis et al., 2001*)[56]. Les objectifs principaux de ces travaux consistent à essayer de reproduire la formation d'un copeau, sa rupture et son écoulement.

L'étape suivante a été de comparer les résultats des modèles avec les premières mesures expérimentales réalisables de façon simple. En ce sens (*Ozel et Zeren, 2004*)[57] utilisent un modèle analytique de type Oxley pour caractériser les contraintes et le frottement dans les zones primaires et secondaires de cisaillement à partir d'essais expérimentaux en coupe orthogonale. Ils définissent ensuite un modèle par éléments finis 2D de la coupe utilisant une loi de Johnson-Cook. Les auteurs comparent ensuite les résultats obtenus sur la forme du copeau, la variation de la contrainte et les efforts de coupe. De la même manière (*Baker, 2004*)[58] étudie la formation du copeau en observant l'évolution de la contrainte d'écoulement à l'intérieur du copeau et des efforts de coupe. Pour ce faire il a mis au point un modèle par éléments finis thermomécanique de coupe orthogonale 2D. Il étudie alors la sensibilité des paramètres de la loi thermomécanique aux différents critères observables dans son modèle.

Plus récemment et dans le cadre du projet PGV les travaux menés par (*Delalandre et al., 2007*)[16] ont permis de définir une simulation 3D de la coupe orthogonale grâce à un modèle eulérien lagrangien arbitraire avec un algorithme de remaillage adaptatif ciblant les zones d'apparition des bandes de cisaillement adiabatique et les zones de contact en bout d'outil. Ces bandes ont été mises pour la première fois en évidence dans les travaux de (*Baker et al., 2002*)[59] et (*Baker, 2003*)[60]. Les auteurs reprennent les hypothèses de

Baker et les intègre dans un modèle 3D. Le cas étudié correspond à un usinage en coupe orthogonale à faible profondeur de passe mais à très haute vitesse de coupe ( $3000 \text{ m.min}^{-1}$ ) dans un alliage Ti6AlV4. L'auteur obtient l'apparition des bandes de cisaillement et retrouve bien le phénomène physique associé correspondant à une chute de contrainte et une augmentation de la température localisées le long d'une direction privilégiée. (voir figure 1.35)

Les travaux plus expérimentaux exposés par (*Ivester et al., 2007*)[61] sont très intéressants. En effet l'auteur développe une mesure par micro-vidéographie de la formation du copeau en coupe orthogonale sur un acier 1045. Pour ce faire il utilise une caméra digitale haute vitesse et un équipement d'acquisition haute fréquence. Ensuite, il compare cette mesure à un modèle par éléments finis validé par la mesure d'efforts de coupe au cours du procédé.

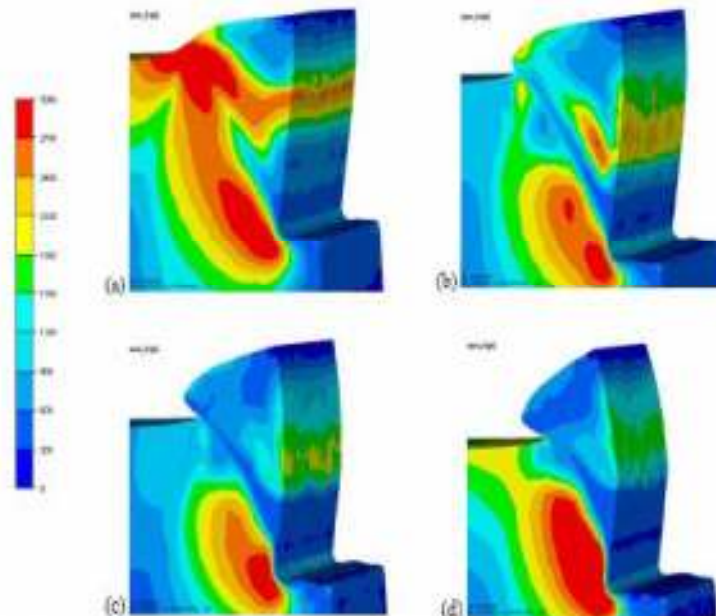


Figure 39: Distributions de contrainte équivalente (MPa) aux temps : (a)  $t = 347.5 \text{ ns}$ , (b)  $t = 406.3 \text{ ns}$ , (c)  $t = 465.0 \text{ ns}$  et (d)  $t = 523.2 \text{ ns}$ .

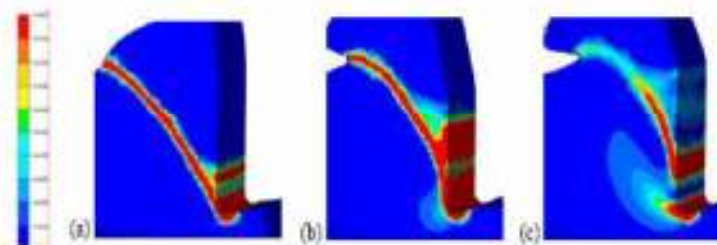


Figure 40: Evolution de la bande de vitesse de déformation aux temps : (a)  $t = 276.9 \text{ ns}$ , (b)  $t = 323.8 \text{ ns}$  et (c)  $t = 412.0 \text{ ns}$ .

FIG. 1.35 – Etude des bandes de cisaillement dans le cas des travaux de Baker. (Résultats du projet PGV) (*Delalandre et al., 2007*)[16]



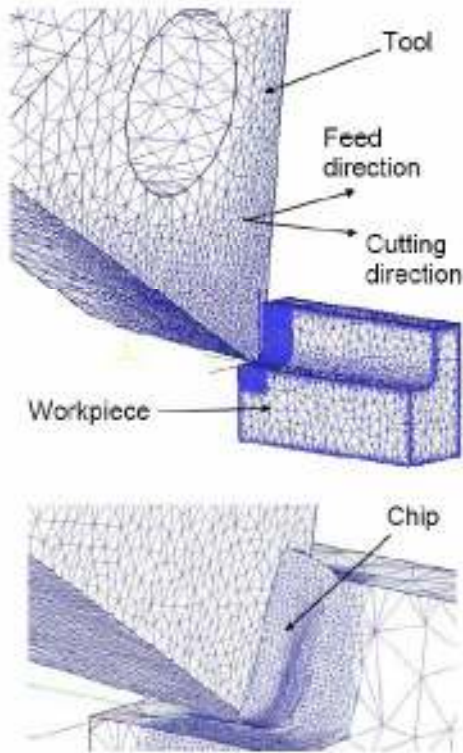
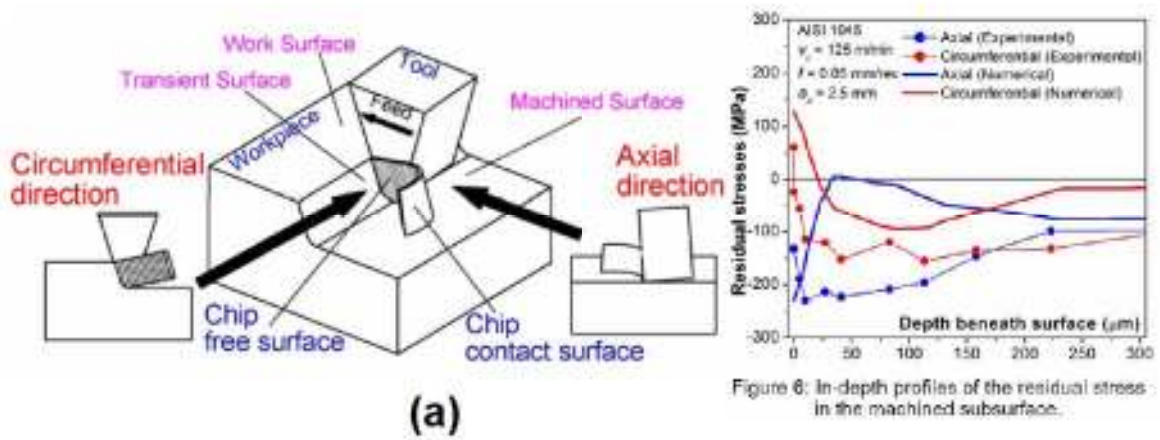
Il obtient donc une vidéo de très bonne qualité où beaucoup d'observations intéressantes peuvent être réalisées. Il caractérise ainsi l'évolution du nombre de segmentations en fonction de la vitesse de coupe et d'avance. Et il observe expérimentalement une zone d'adhésion et de frottement le long de la formation du copeau. Du point de vue de la comparaison avec le modèle éléments finis, les tendances sont les mêmes mais les périodes de segmentation obtenus par simulation sont plus longues que celles du film expérimental.

### 1.8.5 Contraintes résiduelles en usinage

Un autre élément a été abordé par les scientifiques, les contraintes résiduelles présentes dans le matériau après l'opération de coupe. La principale cause de l'apparition de ces contraintes est due à la transformation de phase en surface du matériau. Ces études intéressent beaucoup les industriels, car les contraintes résiduelles présentes sur la surface usinée déterminent les caractéristiques mécaniques de la pièce finie.

La problématique a été étudiée par (*Liu et Guo, 2000*)[62] en construisant, à l'aide du logiciel Abaqus/Explicit©, un modèle par éléments finis avec une approche thermo-viscoplastique. Les auteurs essaient d'observer l'effet d'une passe ou de deux passes successives de l'outil sur la répartition des contraintes résiduelles. Ils soulignent aussi l'effet prépondérant de la modélisation et de la valeur du coefficient de frottement à l'interface outil-copeau sur le profil des contraintes résiduelles. C'est pour cette raison qu'une nouvelle modélisation du frottement est proposée par (*Yang et Liu, 2002*)[63] dans un modèle par éléments finis similaire. Les auteurs proposent d'identifier le coefficient de frottement à partir d'un modèle de répartition des contraintes au lieu de la méthode classique utilisant les efforts de coupe. Les deux approches sont comparées et leur proposition semble améliorer la prédiction du profil des contraintes résiduelles.

Plus récemment (*Outeiro et al., 2007*)[17] ont proposé un modèle par éléments finis 3D du tournage réalisé avec le logiciel Deform3D. Grâce à une mesure des contraintes résiduelles par une technique de diffraction aux rayons X. Une comparaison est menée entre les contraintes résiduelles mesurées et celles simulées, les auteurs comparent aussi les efforts et les champs de température. Mais les écarts observés restent très importants. Les conclusions laissent à penser que le comportement du matériau, la modélisation imparfaite du rayon d'arête de l'outil et les conditions tribologiques inappropriées justifient ces mauvaises estimations. De la même façon et avec un modèle similaire (*Attanasio et al., 2007*)[18] ont étudié expérimentalement les contraintes résiduelles en utilisant le cercle de Mohr pour différentes conditions de lubrification en tournage sur des barres d'acier 1045. Grâce à un modèle par éléments finis et à l'aide d'une étude statistique, les auteurs montrent que le rayon en bout d'outil et l'avance sont les paramètres les plus influents sur les contraintes résiduelles. De plus, le lubrifiant haute performance semble avoir un effet bénéfique mais faible sur les contraintes. (voir figure 1.36)



Residual Stress [MPa]	FEM	Exp	Error
Maximum Principal	368	340	8.2%
Minimum Principal	-170	-164	3.6%

Table 7: Simulative and experimental results

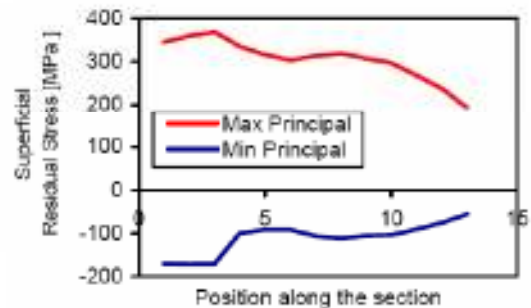
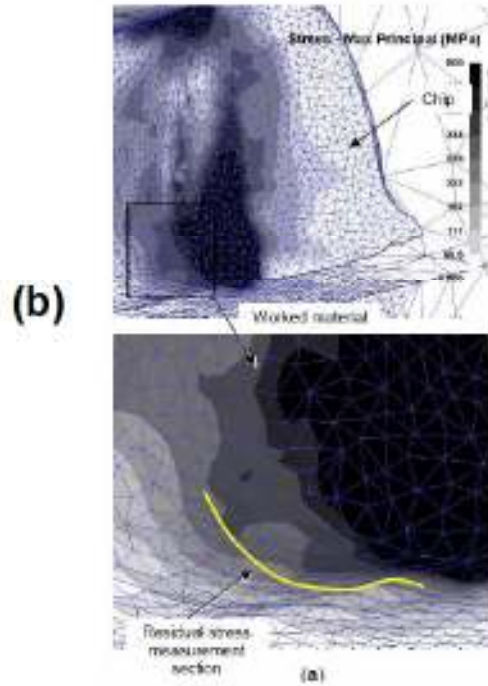


FIG. 1.36 – Résultats obtenus sur les contraintes résiduelles par (a)(Outeiro et al., 2007)[17] et (b)(Attanasio et al., 2007)[18].