

Modélisation de la coupe

Afin de modéliser les procédés de coupe industriels (le tournage, le fraisage, le perçage,...), il est nécessaire de comprendre les phénomènes physiques existants dans des opérations de coupe simples telles que la coupe orthogonale ou oblique avec une arête droite.

Comme vous le savez, l'usinage des métaux met en jeu deux processus élémentaires de formation du copeau qui sont :

- la création d'un copeau,
- l'évacuation d'un copeau.

Ces processus font jouer, et on l'a vu auparavant, deux mécanismes physiques de base qui sont :

- la déformation plastique au sein du copeau ;
- le contact de celui-ci avec l'outil.

C'est ainsi que la modélisation du process de coupe est actuellement orientée principalement vers la modélisation de la formation du copeau. Celle-ci repose sur la compréhension de ces deux mécanismes physiques. Elle a pour objectifs :

- ✓ la prévision de la géométrie du copeau,
- ✓ la prévision des forces de coupe
- ✓ la prévision des échauffements

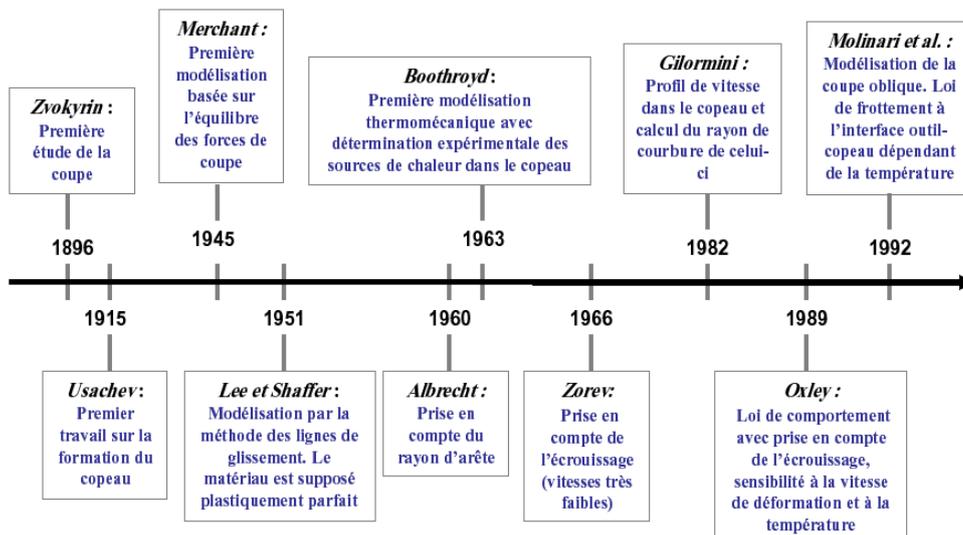
à partir, bien évidemment, des conditions de coupe et des propriétés thermomécaniques du matériau usiné et de l'outil.

Elle devrait donc permettre notamment d'aider à une gestion rationnelle des banques de données sur la coupe et fournir des éléments d'appréciation de divers problèmes pratiques:

- usinabilité d'un matériau, c'est-à-dire son aptitude à l'usinage (forces nécessaires, longueur et forme du copeau...);
- déformation élastique de l'ensemble outil - porte-outil - machine-outil

❖ Modélisation analytique

De nombreux chercheurs ont étudié l'usinage et développé des modèles analytiques.



1. Modèle de Merchant (1945)

Merchant (1945) s'est intéressé au procédé de coupe orthogonale stationnaire avec un copeau non segmenté. Son approche purement mécanique est basée sur l'équilibre des efforts appliqués au copeau.

Merchant est l'un des précurseurs de la modélisation de la coupe. Dans son modèle, la formation du copeau est supposée être due à un intense cisaillement le long d'un plan incliné d'un angle, appelé angle de cisaillement (ϕ), par rapport à la direction de la vitesse de coupe V_c comme le montre le cercle des efforts de Merchant qui suit :

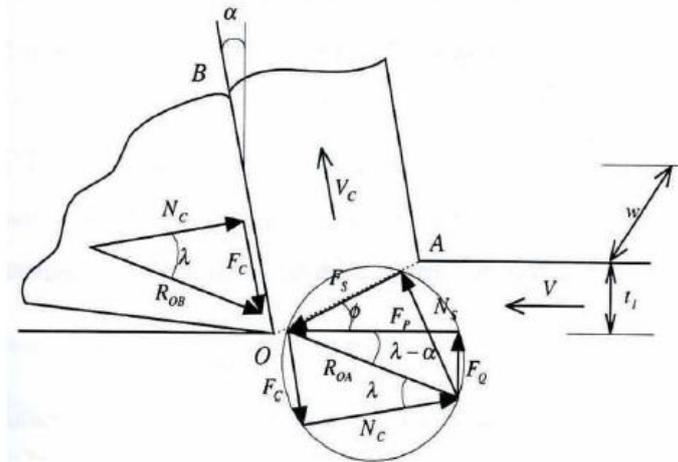


Figure 4.1 : Définition du cercle des efforts de Merchant

Merchant suppose également que l'on se place dans des conditions stationnaires en déformation plane.

L'objet de l'étude est de prédire les efforts de coupe lors d'une opération simple de coupe orthogonale avec une arête droite.

Le modèle est basé sur les principales hypothèses suivantes :

- le matériau usiné a un comportement parfaitement plastique,
- la zone de cisaillement primaire est assimilée à un plan,
- l'interface outil-copeau est le siège d'un frottement de type Coulomb (angle de frottement λ) supposé constant quelles que soient les conditions de coupe,
- le contact est supposé glissant,
- le rayon du bec de l'outil est nul
- le système machine-pièce-outil-porte outil est supposé parfaitement rigide
- l'épaisseur du copeau est constante
- la vitesse de coupe est choisie de façon à obtenir une formation du copeau sans zone morte
- l'avance par tour est grande devant la dimension moyenne des cristaux
- le copeau se forme par glissement interne, suivant des "plans de glissement".

En supposant, la contrainte de cisaillement (τ) uniforme dans le plan de cisaillement, l'effort de cisaillement F_S , dans la zone de cisaillement primaire est donné par la relation :

$$F_S = w l_{OA} \tau = \frac{w t_1}{\sin \phi} \tau$$

Ou : w - désigne la largeur de coupe,

t_1 - la profondeur de coupe (ou avance)

l_{OA} - la longueur de OA (voir la figure définissant le cercle de Merchant).

Les efforts de coupe sont alors calculés à partir de l'équilibre du copeau :

$$\begin{aligned} N_s &= F_s \tan(\varphi + \lambda - \alpha) \\ F_p &= F_s \cos\varphi + N_s \sin\varphi \\ F_q &= -F_s \sin\varphi + N_s \cos\varphi \end{aligned}$$

Ou : F_p et F_q - représentent respectivement les efforts de coupe et d'avance
 N_s - la résultante des contraintes normales le long du plan de cisaillement OA .
 α - l'angle de coupe
 λ - l'angle de frottement (voir figure).

L'angle de cisaillement φ est déterminé en minimisant la puissance totale P dissipée pendant la coupe :

$$P = F_p V = \tau V w t_1 \frac{\cos(\lambda - \alpha)}{\sin\varphi \cos(\varphi + \lambda - \alpha)}$$

La recherche du minimum de P , en supposant que la contrainte de cisaillement τ et l'angle de frottement λ sont constants, donne la relation :

$$\varphi = \frac{\pi}{4} + \frac{\alpha - \lambda}{2}$$

Les relations précédentes permettent alors de donner les expressions des efforts de coupe.

$$\begin{aligned} F_p &= 2 \tau w t_1 \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\lambda - \alpha}{2}\right) \\ F_q &= 2 \tau w t_1 \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\lambda - \alpha}{2}\right) \tan(\lambda - \alpha) \end{aligned}$$

L'épaisseur du copeau est calculée en écrivant la conservation du flux de matière avec l'hypothèse que la vitesse est uniforme de part et d'autre du plan de cisaillement.

L'hypothèse du comportement parfaitement plastique induit l'uniformité de la contrainte normale le long de la face OA .

En écrivant l'équilibre des moments appliqués au copeau isolé (OA étant la frontière par rapport à la pièce), Merchant détermine la longueur de contact l_c entre l'outil et le copeau :

$$l_c = \frac{t_1}{\cos\lambda} \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\lambda - \alpha}{2}\right)$$

Limites du modèle

Les résultats obtenus par ce modèle montrent que les efforts de coupe sont proportionnels à la limite d'élasticité en cisaillement τ , à la largeur de coupe w , et à l'avance t_1 .

Or, il a été montré expérimentalement que ceci n'est pas en accord avec la réalité. A titre d'exemple, il est possible de citer l'effet de la vitesse de coupe qui n'est pas reproduit par le modèle de Merchant.

Contrairement à ce que propose Merchant, l'écoulement de la matière ne peut se faire brusquement à travers le plan OA , mais de manière progressive.

De plus, Merchant suppose que le matériau usiné est parfaitement plastique. Ainsi, il n'y a pas de prise en compte des effets de la vitesse de déformation et de la température sur la contrainte et donc, sur les efforts de coupe.

Merchant néglige également les effets des paramètres de coupe (V, α, t_1) sur les conditions de frottement. Or, de nombreuses études tribologiques ont montré que le coefficient de frottement à l'interface outil-copeau est très sensible aux conditions de coupe et à la température lors des essais.

2. Modèle d'Oxley

Oxley est le premier à présenter une approche thermomécanique de l'usinage. Le modèle donne, en fonction des conditions de coupe, les efforts et les températures moyennes dans les zones primaires et secondaires ainsi que la géométrie du copeau (longueur de contact et épaisseur du copeau).

Son modèle comprend une partie mécanique et une partie thermique issue des travaux de Boothroyd (1963). Le modèle s'appuie sur deux observations fondamentales faites à partir de micrographies :

- le cisaillement primaire s'effectue dans une zone d'une certaine épaisseur,
- le copeau s'écoule le long de la face de coupe de l'outil, ce qui induit une zone de cisaillement secondaire d'épaisseur constante δt_2 (Figure ci-dessous).

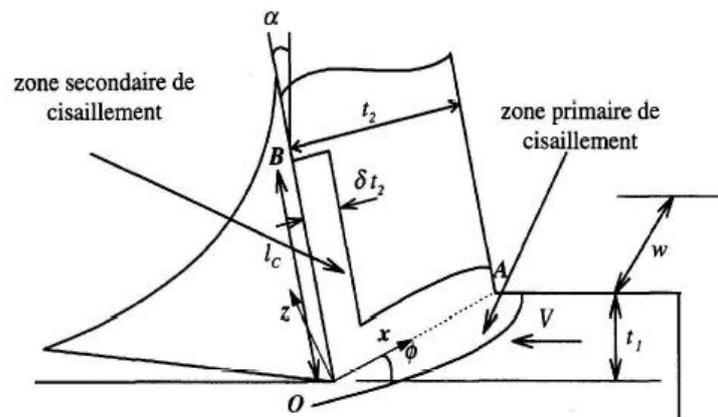


Figure 4.2 : Approche d'Oxley (1989) ; prise en compte des zones primaire et secondaire de cisaillement dans la modélisation.

Les hypothèses de déformation plane et d'état stationnaire sont prises en considération et l'arête de l'outil est supposée parfaitement tranchante. Pour définir le comportement thermomécanique du matériau usiné, l'auteur s'appuie sur la loi de comportement suivante :

$$\bar{\sigma} = \sigma_1(\dot{\bar{\varepsilon}}, \theta) \bar{\varepsilon}^{n(\dot{\bar{\varepsilon}}, \theta)}$$

Ou σ - contrainte équivalente de Von Mises

ε - déformation plastique cumulée.

$\dot{\bar{\varepsilon}}$ - vitesse de déformation équivalente associée à σ ,

θ - température absolue,

n - paramètre d'écrouissage

σ_1 - quantité ayant la dimension d'une contrainte.

La résolution du problème revient à déterminer dans un premier temps les contraintes d'écoulement dans chacune des deux zones puis à écrire les équations d'équilibre ainsi que

l'équation énergétique afin d'obtenir l'angle de cisaillement φ , la longueur de contact outil-copeau l_c et l'épaisseur de la zone de cisaillement secondaire δt_2 .

Points forts de la modélisation d'Oxley

Oxley est le premier auteur à proposer une modélisation thermomécanique de la coupe. En effet, il utilise pour le matériau usiné une loi de comportement thermomécanique et prend en compte les zones de cisaillement primaire et secondaire.

Une comparaison de la modélisation à des mesures expérimentales a été faite sur deux aciers à 0.18 et 0.38% de carbone. Le modèle permet de reproduire certaines tendances expérimentales telles que la décroissance des efforts de coupe ou l'augmentation de l'angle de cisaillement avec l'augmentation de la vitesse.

Points faibles

Le comportement du matériau a été identifié à partir d'essais de compression dynamique ($\varepsilon = 500 \text{ s}^{-1}$). Les vitesses de déformation observées dans la zone de cisaillement primaire sont de l'ordre de $10^4, 10^6 \text{ s}^{-1}$. La loi ainsi obtenue n'est donc pas valable pour ces hautes vitesses de déformation. De plus, la formation du copeau se fait principalement par cisaillement. Il aurait donc été préférable d'identifier la loi sur des essais faisant intervenir les mêmes types de déformations.

De nombreuses relations empiriques (Boothroyd 1963), ainsi que des résultats numériques valables pour des conditions particulières de coupe (Tay et al, 1976) ont été introduites afin de déterminer la vitesse de déformation dans le plan de cisaillement ou la température dans le copeau. Des questions se posent alors sur la validité de ces hypothèses dans le cadre de nouvelles conditions de coupe, ou pour de nouveaux couples outil-matière.

De plus, le modèle ne permet pas de déterminer la distribution de température le long de la face de coupe de l'outil. Or sa connaissance permettrait, à l'aide de modèles d'usure, de prédire la durée de vie des outils en fonction des conditions de coupe.

Oxley détermine le coefficient de frottement à partir de l'estimation de la pression le long du plan OA et ce indépendamment du comportement thermomécanique du matériau usiné, des conditions de coupe ou des relations physico-chimiques à l'interface outil-copeau. Or, on peut montrer facilement que la vitesse ou la température sont des paramètres influant sur le coefficient de frottement moyen.

❖ Modélisation numérique de la coupe (modélisation thermomécanique)

(Approches et développements tirés de revues bibliographique et travaux scientifiques)

Le cadre classique de l'approche numérique est celui des éléments finis. L'utilisation de logiciels généralistes est possible pour la modélisation thermomécanique de la coupe. On peut citer par exemple le logiciel ABAQUS/Explicit avec lequel est classiquement mené la simulation bidimensionnelle de la coupe orthogonale, comme le montre la figure ci-après.

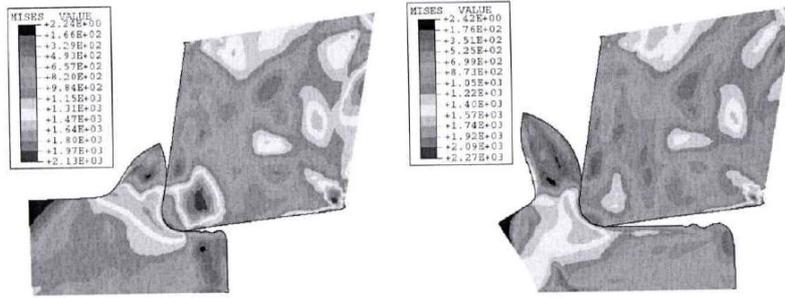


Figure 4.3 : Simulation de la formation d'un copeau avec ABAQUS/Explicit (contrainte équivalente de Von Mises)

D'autres logiciels commerciaux génériques tels que MSC Marc ou Deform sont parfois utilisés.

Les simulations, menées par les chercheurs, avec cette approche, concernent :

- l'étude des bandes de cisaillement et de la segmentation des copeaux en coupe orthogonale,
- la détection des zones de cisaillement et d'échauffement, par exemple pour des outils à arête arrondie ou chanfreinée,
- l'étude des phénomènes thermomécaniques à l'interface outil/copeau, pour des outils revêtus par exemple,
- l'analyse des contraintes résiduelles sur la surface usinée,
- l'étude de la déflexion de parois minces usinées.

Les logiciels, comme AdvantEdge de Third Wave et System, utilisant cette approche, ont été carrément destinés à la coupe.

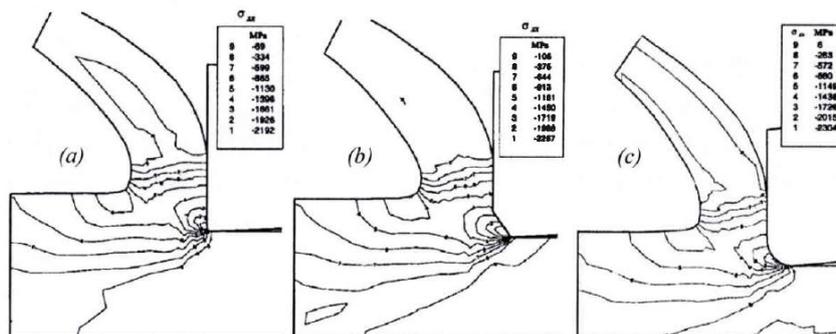


Figure 4.4 : Contrainte σ_{xx} dans un copeau formé avec différentes arêtes de coupe. (a) arête parfaitement tranchante, (b) arête chanfreinée, (c) arête arrondie.

Mais les maillages nécessaires de la pièce avec l'approche "éléments finis" offre des limites à cette approche et pour cause, la matière subit d'importantes déformations dans le cas de la coupe. La coupe oblique et les opérations de fraisage ont montrés ces difficultés de simulation.

Modélisation C-NEM

L'approche C-NEM, ou Méthode des Éléments Naturels Contraints, tout en évitant le problème du remaillage des éléments finis, utilise l'interpolation nodale suivant le diagramme de Voronoi (ensemble de nœuds collés à la matière) qui décrit la surface de la pièce. Ainsi, les milieux fissurés, les bandes de cisaillement peuvent être traités.

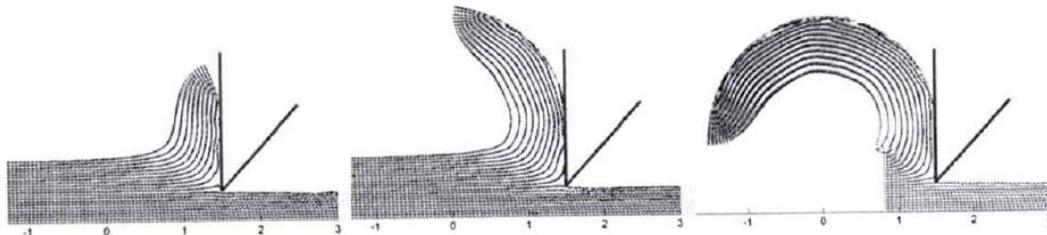


Figure 4.5 : Exemple de simulation de la formation du copeau avec la Méthode des Eléments Naturels.

Comme le processus d'usinage engendre des grandes déformations, des grandes rotations et des grands déplacements, l'approche numérique, comme en approche analytique, utilise aussi des modèles de comportement de la matière usinée et de contacts outil/matière avec plus de développement en formulation Lagrangienne. Le mode couplé, Lagrangien/Eulérien nommé ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian), existe aussi. Il est applicable dans l'étude de la coupe.

Modélisation (SPH)

La méthode SPH ou Smoothed Particle Hydrodynamics est Une nouvelle méthode Lagrangienne de discrétisation spatiale adaptée à ce type de problème.

Les modèles sont développés dans le cadre 2D de la coupe orthogonale et les lois de comportement des matériaux sont les mêmes que pour les méthodes classiques d'éléments finis.

La différence, par rapport à la méthode des éléments finis, réside dans 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

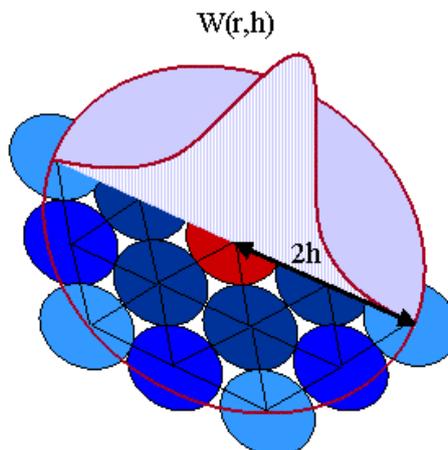


Figure 4.6 : Fonction d'interpolation et sphère d'influence.