

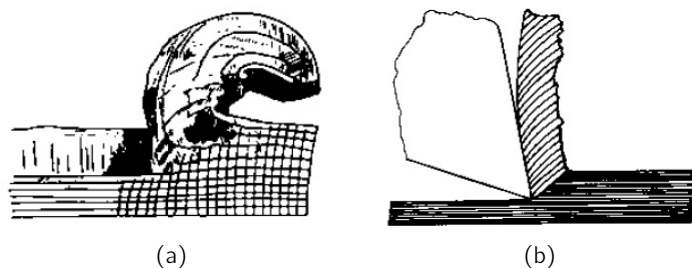
# Généralités sur l'usinage

## 1.1 Caractérisation de la coupe des métaux

Les premiers écrits traitant de la caractérisation de la coupe de métaux figurent dans les travaux de [Tresca \(1878\)](#) concernant le choix de la géométrie de l'outil et de la profondeur de passe (figure 1.1a). Le choix de ces paramètres devant être basé sur l'observation de la déformation générée dans le copeau, [Tresca](#) remarqua, pour une géométrie d'outil constante, qu'une profondeur de passe insuffisante produisait plus de déformation plastique qu'une profondeur de passe importante. Cette observation ouvrit la voie du développement de machines plus rigides et plus puissantes. Trois années plus tard, [Mallock \(1881\)](#) décrit la formation du copeau comme le résultat du cisaillement de la matière, dont la déformation est influencée par le frottement entre la face de coupe de l'outil et le copeau (figure 1.1b). Les travaux qui suivirent décrivent la coupe par trois zones. La première étant la zone de cisaillement primaire initialement décrite, la seconde étant située entre la face de coupe de l'outil et le copeau où se produit le frottement évoqué par [Mallock](#) et la troisième se situant au niveau du contact de la face en dépouille sur la surface usinée. Ces travaux introduisirent les trois principaux phénomènes qui caractérisent la coupe des métaux, à savoir :

- la plasticité,
- le frottement,
- la thermique.

Les premiers travaux sur la coupe étaient en grande majorité des observations du phénomène dans le but d'améliorer la tenue des outils dans les métaux, technologie alors récente. Datant de cette période, les travaux de [Taylor \(1907\)](#) demeurent encore aujourd'hui une référence pour le suivi de l'usure de l'outil. Il faudra attendre les préparatifs de la seconde guerre



**Fig. 1.1** – Observations de la coupe des métaux par (a) [Tresca \(1878\)](#) et (b) [Mallock \(1881\)](#).

mondiale, mais surtout les années 1950-1960 pour voir se développer les premières théories prédictives sur la coupe des métaux.

### 1.1.1 Paramétrage de la coupe

Une opération d'usinage est définie par certaines grandeurs appelées paramètres de coupe. Deux sous-catégories peuvent être définies parmi ces paramètres ; les paramètres opératoires, liés aux mouvements de coupe, et les paramètres géométriques propres à l'outil. Les paramètres opératoires comportent :

- la vitesse de coupe  $V_c$  en m/min,
- l'avance par tour  $f$  en mm/tr,
- la profondeur de passe  $a_p$  en mm.

Pour une configuration d'arêtes de coupe multiples, e.g. en fraisage, l'avance par dent  $f_z$  sera définie ainsi que l'engagement radial  $a_e$ . Sont accessoirement définies la section de coupe  $A_D$  en mm<sup>2</sup> et l'épaisseur localement coupée  $h$  en mm. Les paramètres géométriques se résument généralement à :

- l'angle de coupe  $\gamma$ ,
- l'angle de dépouille  $\alpha$ ,
- l'angle d'inclinaison d'arête  $\lambda_s$ ,
- l'angle de direction d'arête  $\kappa_r$ ,
- le rayon d'acuité d'arête  $r_\beta$ .

Ces paramètres sont généralement associés à un indice correspondant au plan dans lequel est réalisée leur mesure (cf. annexe A). Dans un souci de simplification, la coupe des métaux est décrite dans une configuration dite de « coupe orthogonale ». Cette configuration permet de considérer que la formation du copeau est un problème plan. L'avantage principal concerne les hypothèses de modélisation. Les grandeurs mesurées en coupe orthogonale sont, par conséquent, mesurées dans le plan orthogonal  $P_o$  de l'outil. Par souci de simplification, la configuration de coupe oblique ne sera pas décrite ici, l'angle d'inclinaison  $\lambda_s$  est donc supposé nul. Les plans  $P_o$  et  $P_n$  sont alors confondus et les grandeurs décrivant la géométrie de l'outil se résument à :

- l'angle de coupe  $\gamma_n$ ,
- l'angle de dépouille  $\alpha_n$ ,
- le rayon d'acuité d'arête  $r_\beta$ .

Les paramètres opératoires sont redéfinis par l'épaisseur coupée  $h^a$  et la largeur de coupe  $b$ , la vitesse de coupe reste inchangée.

### 1.1.2 Phénoménologie de la formation du copeau

La coupe des métaux est traditionnellement caractérisée par les trois zones visibles sur la figure 1.2. L'outil pénètre dans la matière, les efforts intenses produits par le mouvement de coupe créent alors un copeau sous l'action de la face de coupe par un procédé de cisaillement appelé cisaillement primaire. Dans la majorité des cas, la zone de cisaillement se présente sous la forme d'une bande dont l'épaisseur  $t_s$  varie sous l'effet de la vitesse de cisaillement  $V_s$  et du matériau usiné. La localisation de la bande de cisaillement se traduit dans le copeau par un aspect plus ou moins continu comme l'indique la figure 1.3. Thomsen *et al.* (1965) affirment également que cette bande peut avoir une courbure modifiant l'évolution de la contrainte normale le long de la bande. Cependant, le rapport entre l'épaisseur de la bande et son rayon de courbure permet dans la grande majorité des cas d'approximer la

a. L'épaisseur coupée  $h$  est égale à l'avance par tour  $f$  dans ce cas.

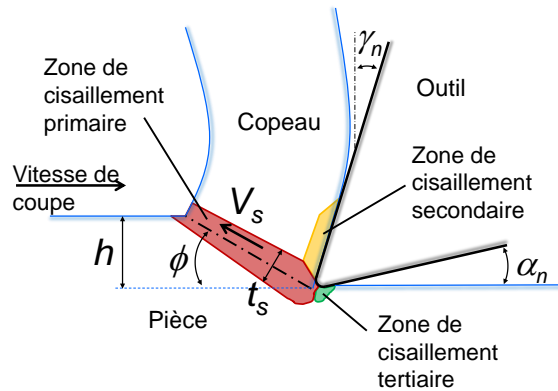


Fig. 1.2 – Représentation en coupe orthogonale des zones de cisaillement.

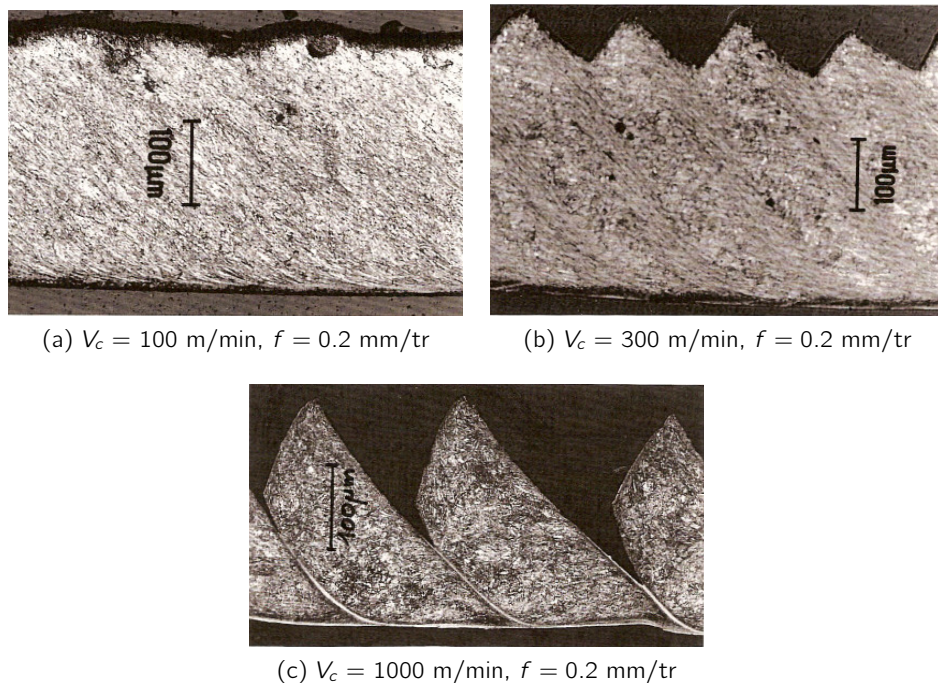


Fig. 1.3 – Copeaux de 33CrMoV12-9 de types (a) continu, (b) faiblement discontinu et (c) fortement discontinu d'après Le Calvez (1995).

bande comme rectiligne. Dans le cas de vitesses de coupe permettant d'atteindre un régime de cisaillement adiabatique (figure 1.3c), la bande pourra être qualifiée de « plan de cisaillement ». Les sollicitations mécaniques auxquelles sont soumises cette bande sont des vitesses de déformation  $\dot{\epsilon}$  comprises entre  $10^3$  et  $10^5$  s<sup>-1</sup> et une déformation équivalente  $\bar{\epsilon}$  comprise entre 0.9 et 1.3. La vitesse de déformation est déterminée à partir d'une relation fonction de la vitesse de cisaillement et de l'épaisseur  $t_s$  de la bande, le second étant une conséquence du premier. Par conséquent, la vitesse de déformation s'avère souvent mal évaluée, ce qui nuit à l'emploi de lois de comportement dépendantes de  $\dot{\epsilon}$ .

La seconde zone est située à l'interface outil-copeau. C'est une zone de frottement intense entraînant parfois un cisaillement secondaire. Comme observé par Mallock, cette zone a une

influence sur le cisaillement primaire. Cependant, comme l'ont observé [Doyle et al. \(1979\)](#)<sup>b</sup>, le frottement sur la face de coupe n'est pas homogène. La zone de cisaillement secondaire peut être, selon les cas, subdivisée en sous-zones correspondant aux mécanismes de contact entre les matériaux constituant l'outil et la pièce usinée. Généralement, deux sous-zones sont définies<sup>c</sup>. La première débute au niveau de l'arête pour s'achever à une distance égale à deux ou trois fois l'épaisseur coupée  $h$  selon [Doyle et al. \(1979\)](#). [Ackroyd et al. \(2003\)](#) ne statuent pas sur sa longueur mais confirment les observations de [Doyle et al.](#) en affirmant que cette sous-zone se caractérise par un frottement d'adhésion. Un régime de grippage — *seizure* en anglais — est atteint par le matériau qui est cisailé à une contrainte égale à la limite élastique en cisaillement. La seconde sous-zone constitue la fin du contact outil-copeau. Elle est caractérisée par un frottement de glissement. L'existence de ces deux sous-zones peut s'expliquer, d'après [Barrow et al. \(1982\)](#), par la distribution décroissante de la pression de contact sur la face de coupe. Les auteurs évaluèrent cette pression à l'aide d'un outil segmenté équipé de jauges de déformation, connu sous le nom de *split tool*.

La troisième zone est localisée au niveau de la face en dépouille de l'outil. Les propriétés élastiques du matériau usiné occasionnent un contact entre l'outil et la surface usinée. Le mécanisme de sollicitation de la matière est semblable au rayage, il s'agit du *ploughing effect* ou « effet d'indentation ». Par souci d'harmonisation des terminologies, le qualificatif de zone de cisaillement tertiaire est fréquemment rencontré pour cette zone, le cisaillement n'étant pourtant pas le mécanisme principal. Les effets de cette zone sont détaillés dans la section 1.2 car ils deviennent fortement perceptibles pour de faibles épaisseurs coupées. Cette zone est notamment à l'origine de l'usure en dépouille  $V_B$  de l'outil et de certains défauts de surface.

## 1.2 Spécificités de l'usinage de super finition

Le micro-usinage et l'usinage de finition sont des procédés soumis à un important effet d'échelle ([Liu et al., 2004](#)). En effet, l'épaisseur coupée est souvent très proche de la valeur du rayon d'arête  $r_\beta$  voire inférieure. Ce rayon crée une partition d'écoulement de la matière entre la face de coupe et la face de dépouille. C'est en particulier ce second flux de matière qui cause le phénomène connu sous le nom d'effet d'indentation. Ce phénomène est en partie responsable des problèmes d'intégrité de la matière pouvant être relevés dans les pièces usinées. En tournage, la super finition est un procédé alternatif ou complémentaire à une opération de rectification permettant d'atteindre des rugosités totales moyennes inférieures à 10  $\mu\text{m}$ . Elle se caractérise par une profondeur de passe et une vitesse d'avance faibles, ce qui a pour effet de réduire l'épaisseur du copeau généré. L'outil se trouve alors dans une configuration analogue à celles rencontrées en micro-usinage.

### 1.2.1 Causes de l'effet d'indentation

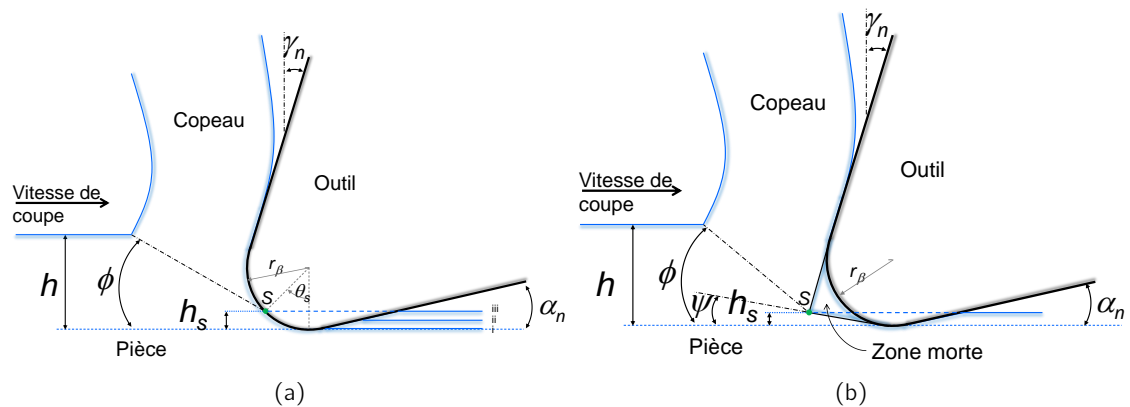
L'effet d'indentation est aujourd'hui encore un phénomène relativement méconnu. L'acuité de l'arête de coupe n'est jamais parfaite et le rayon d'arête faisant la jonction entre les faces de coupe et de dépouille tend à générer une zone morte ou un point de stagnation dont la géométrie varie en fonction des paramètres de coupe. Ce phénomène a la particularité de séparer la matière entre la face de coupe et la face de dépouille mais également d'exercer une poussée supplémentaire sur l'outil. Ces deux actions contribuent à déformer la matière qui constituera la pièce finie.

---

b. Les auteurs utilisent des outils en saphir et observent au travers le contact avec le copeau.

c. L'intérêt d'identifier ces sous-zones est plus largement développé dans la section 2.2.2.

L'existence d'un point de stagnation est souvent supposée, e.g. par [Manjunathaiah et Endres \(2000\)](#), et fût par ailleurs décrite dans l'une des premières modélisations ([Albrecht, 1960](#)). Comme illustré par la figure 1.4a, le flux de matière se divise au point  $S$  en deux parties se répartissant entre le copeau — épaisseur  $h$  et angle  $\phi$  — et la face de dépouille — épaisseur non coupée  $h_S$ . Concernant cette dernière partition, les avis divergent entre comportement purement plastique (i), élasto-plastique (ii) et purement élastique (iii) de la matière après le passage de l'outil. Pour [Connolly et Rubenstein \(1968\)](#), [Rubenstein \(1990\)](#) et [Endres et al. \(1995a\)](#), le comportement est purement élastique. [Abdelmoneim et Scrutton \(1973\)](#) considèrent un comportement élasto-plastique. Enfin, [Albrecht \(1960\)](#) et [Abdelmoneim et Scrutton \(1974\)](#) supposent qu'il n'y a pas de retour de matière sur la face en dépouille, cette dernière hypothèse ne satisfaisant pas le principe de conservation du volume. En effet, en supposant la déformation plastique du matériau en pointe d'outil et le principe de conservation du volume, le cas (iii) de la figure 1.4a est le plus plausible. Cette hypothèse est confortée par la continuité des vitesses dans cette zone.



**Fig. 1.4** – Paramétrage (a) du point de séparation et (b) de la zone morte en amont de l'outil d'après [Waldorf et al. \(1999\)](#).

Dans le cas de la présence d'une zone morte, cette séparation se produit en amont de l'outil. D'après la figure 1.4b, la zone morte a la particularité d'accroître considérablement la surface en contact avec la matière usinée. Cependant, la géométrie de cette zone est à la fois fonction de la géométrie de l'arête mais également des paramètres de coupe, d'où une difficulté certaine pour son évaluation. [Waldorf et al. \(1999\)](#) considèrent la limite supérieure de la zone morte comme le prolongement de la face de coupe et sa limite inférieure comme inclinée d'un angle  $\psi$  par rapport à la face de coupe tel que représenté sur la figure 1.4b. Cet angle étant fonction de l'angle de coupe  $\gamma_n$  et de l'épaisseur non coupée  $h_S$  tel que

$$\psi = \arctan \left( \frac{h_S}{r_\beta \tan \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\gamma_n}{2} \right) - h_S \tan \gamma_n} \right). \quad (1.1)$$

D'après [Karpat et Özel \(2008\)](#), une zone morte est générée par l'emploi d'outils à angle de coupe  $\gamma_n$  négatifs tandis que les outils à angle de coupe positifs tendent à séparer la matière autour d'un point de stagnation sur l'arête. L'effet d'indentation est couramment évoqué en présence de vibrations. Dans ce cas précis, un contact avec la face en dépouille est réalisé périodiquement en fonction de la fréquence des vibrations. Les propriétés du contact en présence de vibrations diffèrent des cas précédents en raison de la discontinuité du contact le long de la face en dépouille. En effet, dans le cas vibratoire, la matière peut entrer en contact

