

INTRODUCTION

On appelle usinage toute opération de mise en forme par enlèvement de matière, destinée à conférer une forme, des dimensions et un état de surface adaptés à l'utilisation finale d'une pièce, tout en respectant les tolérances préconisées [Felder 1997]. Ainsi l'*Usinage à Grande Vitesse* (UGV) concerne les procédés d'usinage pour lesquels les paramètres de coupe sont très supérieurs à ceux utilisés en usinage conventionnel (ces paramètres seront définis dans le paragraphe I.1.2.2.). D'une manière générale, un procédé d'usinage est dit « à grande vitesse », lorsque la vitesse de coupe est deux à trois fois celle de l'usinage conventionnel [Defretin 1999]. La figure I.1 présente l'ordre de grandeur des vitesses de coupe en usinage traditionnel, usinage traditionnel optimisé et usinage à grande vitesse pour différents matériaux, en fraisage, tournage et rectification.

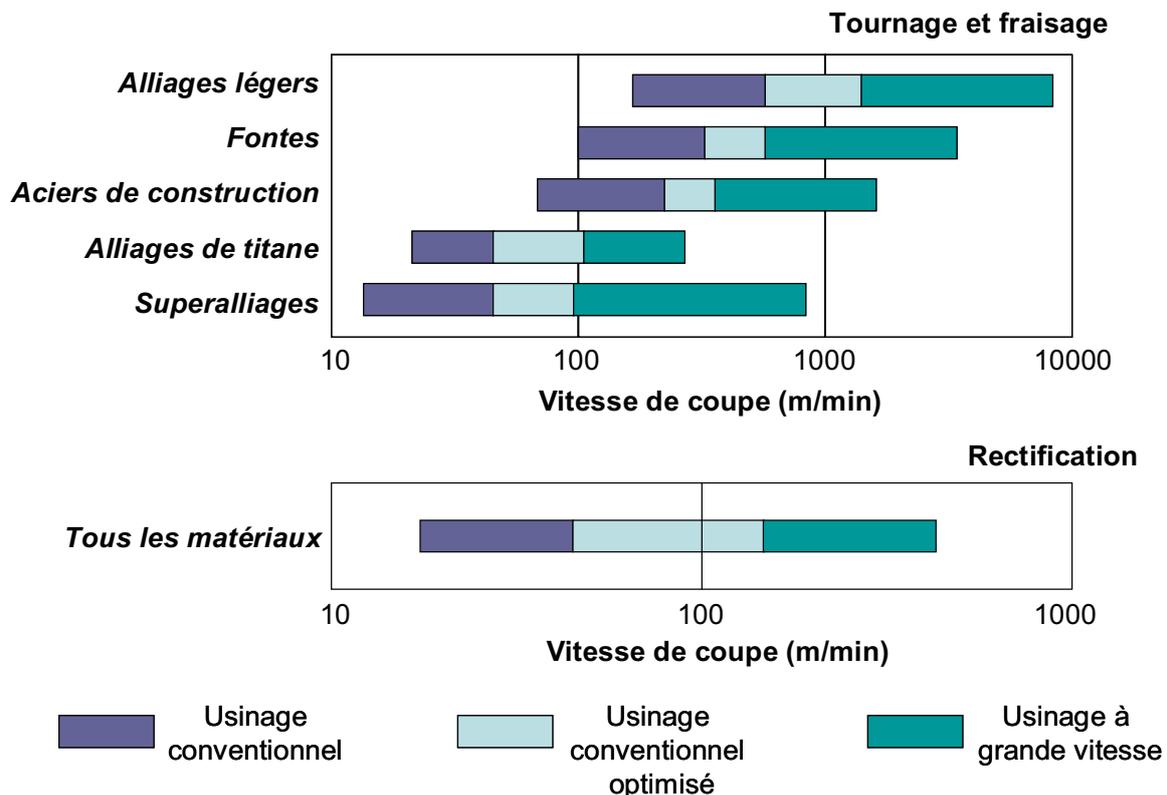


Figure I.1. Domaine de vitesses de coupe en usinage à grande vitesse [Defretin 1999].

Historiquement l'usinage à grande vitesse a connu différentes étapes [Chambe 2000] :

- La première correspond à une période durant laquelle des travaux expérimentaux, conduits dans des laboratoires de recherche, ont mis en évidence les effets de l'augmentation de la vitesse de coupe sur la déformation des matériaux.

- La seconde période a été essentiellement basée sur la connaissance du comportement des matériaux soumis à des grandes vitesses de déformation. Ces études faisaient appel à des techniques permettant d'atteindre des vitesses très élevées, telles que les expériences balistiques. Ces travaux ont permis notamment de connaître l'influence de la vitesse de coupe sur les efforts de coupe ainsi que sur la température de la surface usinée.
- L'étape suivante correspond également à des études expérimentales, mais cette fois-ci le site d'expérience devient la machine outil, s'agissant généralement de prototypes. Les conditions expérimentales se rapprochent alors de ce que deviendra la production par usinage à grande vitesse.
- La dernière étape consiste en l'industrialisation du procédé d'usinage à grande vitesse. Ces travaux ont conduit à l'amélioration des prototypes et à la mise sur le marché de machines permettant d'usiner à grande vitesse dans une configuration industrielle.

Cependant, l'intégration de l'usinage à grande vitesse dans un atelier de fabrication impose le respect de certaines contraintes, sans lesquelles le procédé peut devenir dangereux et économiquement peu rentable. Augmenter la vitesse peut paraître simple, mais les mécanismes physiques qui interviennent ne sont plus les mêmes qu'en usinage traditionnel et ils se révèlent relativement complexes. En effet, les paramètres d'usinage ont une réelle, mais pas toujours maîtrisée, influence sur les efforts de coupe, la puissance de la machine, la température atteinte sur la surface usinée et dans l'outil, l'usure des outils, le frottement entre l'outil de coupe et le copeau et l'intégrité de la surface usinée, entre autres. De plus, d'autres problèmes pratiques tels que les phénomènes de vibration autoexcitée (broutage), l'évacuation des copeaux, l'utilisation des lubrifiants lors de l'usinage, et bien d'autres, doivent être pris en compte.

Malgré la complexité du procédé et les contraintes liées à sa mise en place, l'usinage à grande vitesse assure des gains importants en performances techniques et économiques. Globalement, l'UGV apporte :

- l'obtention d'un excellent état de surface de l'ébauche jusqu'à la finition (souvent sur une même machine) ce qui permet une réduction du temps de polissage de finition, voire sa disparition dans la gamme de production,
- une précision dimensionnelle plus grande et une meilleure répétabilité pour la production de séries,
- une meilleure qualité des pièces usinées en termes d'intégrité de surface,
- une réduction des efforts d'usinage,
- l'usinage de matériaux très durs, difficilement usinés auparavant,
- l'usinage de formes complexes et de parois minces,
- l'obtention de copeaux fragmentés, plus simples à évacuer,
- une réduction des délais de fabrication qui se traduit par une augmentation de la productivité,
- une réduction des coûts d'investissement (réduction du stock d'outils, augmentation de la durée de vie des outils...) et des gains par flexibilité de l'outil de production.

Parmi les principaux inconvénients liés à la pratique de l'usinage à grande vitesse on peut signaler [Sandvik 2004] :

- les opérateurs et programmeurs des machines doivent suivre des formations particulières qui diffèrent considérablement de celles nécessaires pour l'usinage conventionnel,
- une erreur humaine peut avoir des conséquences très significatives sur la machine, du fait des importantes vitesses et des accélérations mises en jeu lors du déplacement des différents composants,
- des précautions maximales au niveau de la sécurité doivent être adoptées : les machines doivent être dotées de carters résistant à des sollicitations du type impact. De même, les outils et pièces tournantes doivent faire l'objet de contrôles fréquents afin de détecter de possibles défaillances par fatigue.

Actuellement, la recherche et le développement dans l'usinage à grande vitesse sont axés sur deux grands thèmes : l'usinage assisté (usinage assisté par laser, usinage assisté par jet d'eau à haute pression) et l'usinage écologique.

L'usinage assisté permet d'améliorer les performances des opérations d'usinage mais par différentes méthodes [Vigneau 1999] :

- l'assistance laser, en chauffant la matière avant l'action de l'outil, contribue à diminuer les propriétés mécaniques du matériau à usiner. Cependant elle nécessite des outils de coupe résistants à de hautes températures.
- l'assistance par jet d'eau à haute pression facilite l'usinage en réduisant le frottement entre le copeau et l'outil de coupe. Cela entraîne une diminution de la température à l'interface copeau-outil et permet une augmentation de la durée de vie des outils.

Le développement d'initiatives gouvernementales concernant la prévention de la pollution et l'intérêt accru des consommateurs pour des produits élaborés dans le respect de l'environnement ont mis en place une pression croissante sur l'industrie afin de minimiser le flux de ses rejets. La lubrification représente en effet *une source énorme de dépenses* pour l'industrie de l'usinage. En plus des coûts des lubrifiants, s'ajoutent les coûts de traitement des fluides usagés. De plus, dans des conditions de vitesses et températures élevées, le fluide de coupe est évaporé, atomisé sous forme d'un brouillard qui représente un risque majeur pour la santé des opérateurs.

L'usinage écologique est souhaitable et sera considéré dans un avenir proche comme une nécessité. L'usinage écologique pourra déboucher sur l'usinage à sec (sans aucun fluide de coupe) dont les avantages sont :

- la non pollution de l'atmosphère ou de l'eau, ce qui réduit les risques sanitaires en particulier ceux conduisant à des maladies respiratoires ou de la peau.
- la suppression des résidus de fluides de coupe sur les pièces usinées, permettant d'éliminer les opérations de nettoyage et de lessivage de ces pièces, et les coûts et énergies consommés associés à ces opérations.
- la suppression des résidus de lubrifiant sur les copeaux, réduisant ainsi les coûts de traitement de ces copeaux et les énergies consommées associées.

Ce chapitre est articulé en trois parties. Dans la première partie, nous nous intéresserons aux différentes caractéristiques de l'usinage à grande vitesse. Nous mettrons en évidence les mécanismes physiques de la coupe qui conduisent à la formation du copeau. Certaines

caractéristiques du procédé, tels que les paramètres de coupe, la géométrie des outils ainsi que divers aspects thermiques seront présentés. Nous étudierons ensuite les différents types de copeaux obtenus en usinage, ainsi que les principales théories sur leur formation. Une attention particulière sera apportée à la description des différents types de bandes de cisaillement qui peuvent être rencontrées dans les copeaux obtenus par usinage à grande vitesse. Finalement, nous présenterons le concept d'intégrité de surface dans le cadre de l'usinage.

La deuxième partie de ce chapitre sera consacrée à la présentation du matériau étudié. Les principales propriétés physiques et les domaines d'utilisation les plus répandus seront évoqués. Par la suite, le titane et ses alliages, notamment l'alliage TA6V utilisé dans cette étude, seront décrits sous une approche métallurgique. De même, les modes de déformation du titane feront l'objet d'une présentation.

Enfin, un bilan sera dressé concernant l'usinabilité du titane et de ses alliages. On s'intéressera notamment aux propriétés qui affectent l'usinabilité, ainsi qu'aux problèmes rencontrés lors de la coupe. De la même façon, les principaux matériaux des outils et les différents types de revêtements utilisés pour l'usinage de ces alliages seront présentés.

I.1. ETUDE DE L'USINAGE A GRANDE VITESSE

I.1.1. MECANISMES PHYSIQUES DE LA COUPE

La plupart des opérations d'usinage présentent des interactions outil-pièce tridimensionnelles, généralement très complexes à modéliser et à simuler numériquement. Afin de comprendre les mécanismes physiques qui conduisent à la coupe, il est intéressant de se placer dans une configuration appelée *coupe orthogonale* car elle apporte des simplifications géométriques et cinématiques permettant d'étudier le procédé d'usinage comme un problème bidimensionnel [Davies 2001]. On se place alors dans le cas où l'arête de coupe de l'outil est supposée parfaite (non arrondie) et la face de dépouille n'est pas en contact avec la surface usinée. Les paramètres de coupe se limitent alors à la vitesse de coupe et à la profondeur de passe. En considérant le processus de la coupe comme stationnaire, et compte tenu du faible rapport entre l'épaisseur et la largeur du copeau, il est possible d'étudier la formation du copeau comme un problème de déformation plane, bidimensionnel et indépendant du temps. [Felder 2006].

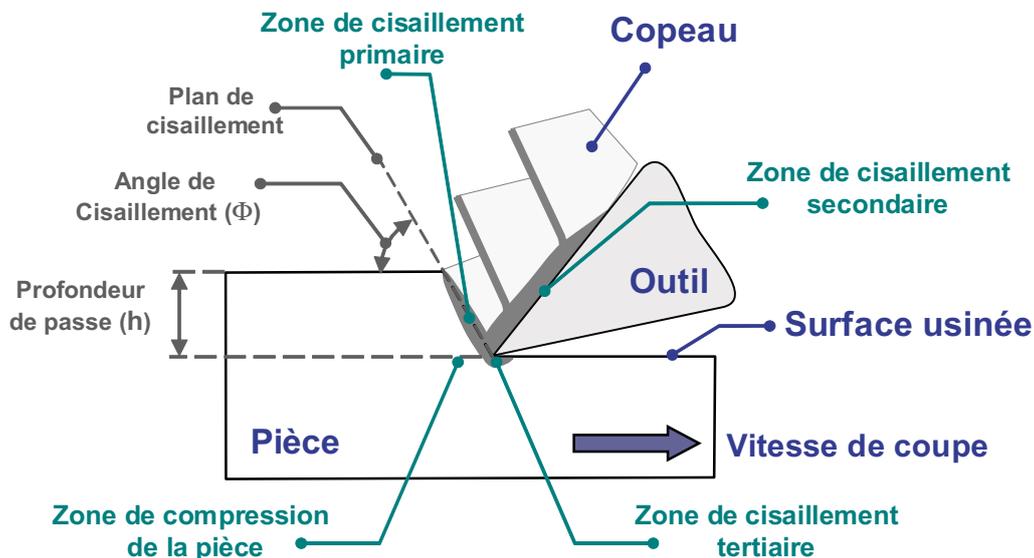


Figure I.2. Géométrie de la formation du copeau en coupe orthogonale et zones de cisaillement.

Un outil élémentaire animé d'un mouvement relatif par rapport à la pièce à usiner, attaque cette dernière par sa face de coupe. Le contact des deux corps provoque un cisaillement entre la pointe de l'outil et la surface libre de la pièce (fig. I.2). La formation du copeau s'effectue alors par cisaillement de la matière en amont de la pointe de l'outil. Deux surfaces vierges sont ainsi créées : la surface usinée de la pièce et la face extérieure du copeau.

Les interactions entre l'outil, le matériau à usiner et le copeau formé conduisent à la formation de quatre zones différentes qu'on peut distinguer ainsi :

I Zone de cisaillement primaire : aussi appelée zone immédiate de formation du copeau, elle s'étend de l'arête de coupe jusqu'à la surface libre du copeau. Dans cette zone, une déformation très intense a lieu et les grains constituant le copeau sont allongés suivant le plan de cisaillement faisant un angle Φ (angle de cisaillement) avec la surface usinée. Cet angle et l'épaisseur effective du copeau dépendent, entre autres, de la profondeur de passe, de l'angle de coupe et des propriétés du matériau usiné.

II Zone de cisaillement secondaire (zone d'écroissage du copeau) : elle se situe à l'interface outil-copeau. C'est une zone de frottement qui est responsable entre autre de l'usure de la face de coupe de l'outil.

III Zone de cisaillement tertiaire (zone d'écroissage de la pièce) : c'est une zone de frottement entre la face de dépouille et la surface usinée, suite au retour élastique de la matière après le passage de la pointe de l'outil. Elle donne naissance à l'usure en dépouille de l'outil de coupe (pour une meilleure compréhension, la géométrie de l'outil de coupe sera présentée dans le paragraphe I.2.3. et les figures I.4 et I.5).

IV Zone de compression de la pièce : à cet endroit, l'outil exerce sur la matière un effort de compression intense. L'existence de cette zone est intimement liée à la géométrie de l'outil de coupe (rayon d'arête).

I.1.2. MISE EN OEUVRE DE LA COUPE ORTHOGONALE ET PARAMETRES DE COUPE

I.1.2.1. Configurations géométriques utilisées en coupe orthogonale

Lors de la mise en œuvre de la coupe orthogonale avec un tour, deux configurations différentes peuvent être utilisées (fig. I.3). Dans la configuration à gorges pré-usinées, l'outil est animé d'un mouvement de translation unidirectionnel perpendiculaire à l'axe de la pièce en rotation. L'outil vient donc usiner une surface cylindrique, correspondant à la matière placée entre deux gorges pré-usinées successives (ou entre la surface libre de la pièce et la première gorge pré-usinée). Dans la deuxième configuration, une pièce tubulaire est animée d'un mouvement de rotation. L'outil se déplace linéairement dans une direction parallèle à l'axe du cylindre et vient usiner la surface transversale du tube.

Ces deux configurations géométriques présentent des avantages et des inconvénients. Le tableau I.1 présente une comparaison entre ces deux géométries concernant leur mise en œuvre.

I.1.2.2. Paramètres de coupe

Il est nécessaire d'introduire les principaux paramètres de coupe car ils conditionnent les phénomènes physiques ayant lieu lors de l'usinage. Ils seront définis dans le cadre de la coupe orthogonale réalisée sur un tour.

Vitesse de coupe

Pour une pièce d'un diamètre D (m) (fig. I.3), tournant à une vitesse ω (rad/s), la vitesse de coupe V_c (m/s) peut se définir selon l'équation (I.1).

$$V_c = \frac{D}{2} \omega \quad \text{(I.1)}$$

Profondeur de passe

La profondeur de passe h , également appelée *profondeur de coupe*, correspond à l'épaisseur de matière enlevée sur la pièce lors du passage de l'outil coupant (fig. I.2). Dans le cas de la coupe orthogonale, elle correspond à la différence de rayon ou de longueur de la pièce avant et après un tour d'usinage, selon la configuration géométrique choisie. C'est à dire, la profondeur de passe correspond à la vitesse d'avance.

Largeur d'usinage

La largeur d'usinage w correspond à la largeur de contact entre l'outil et la pièce usinée. Elle varie selon la configuration géométrique de la coupe orthogonale choisie : dans la géométrie à gorges pré-usinées, la largeur de coupe correspond à la largeur de la matière entre deux gorges successives, tandis que dans la configuration tubulaire, elle correspond à l'épaisseur du tube.

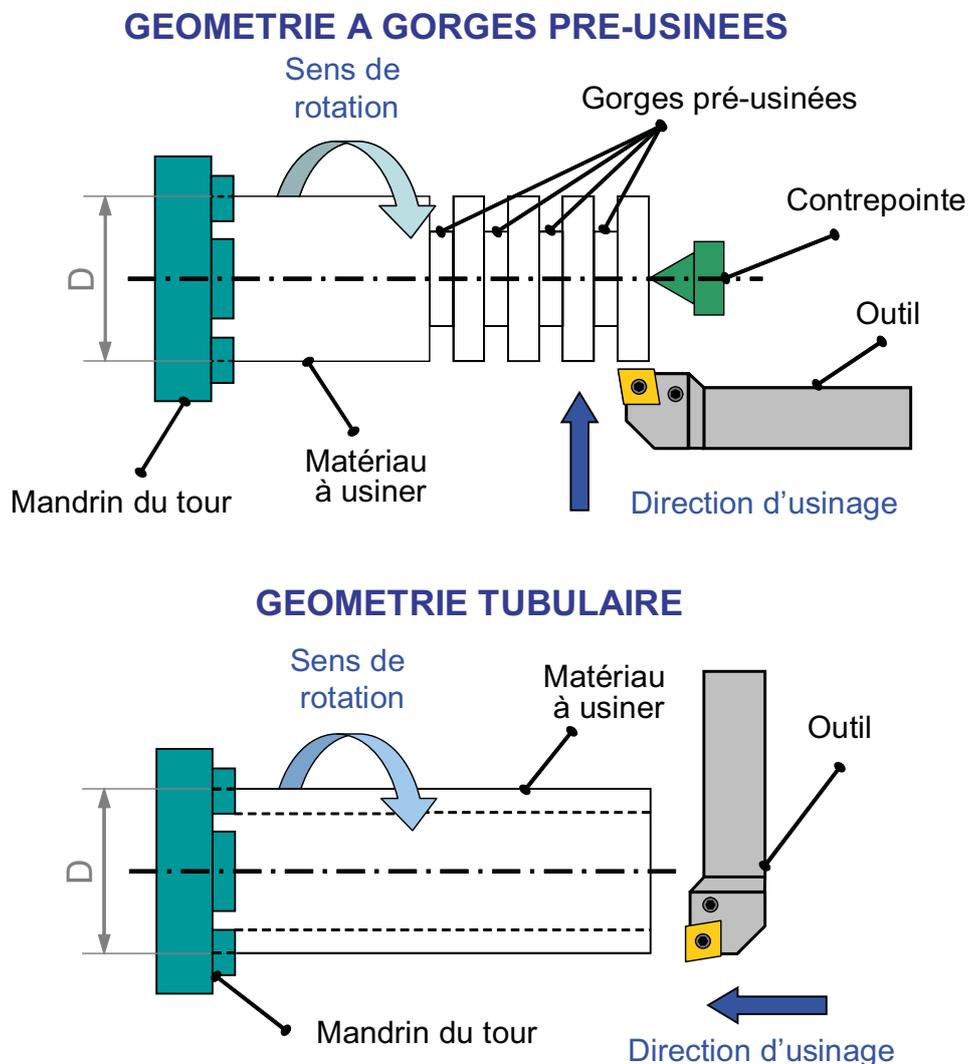


Figure I.3. Configurations géométriques pour la mise en œuvre de la coupe orthogonale sur un tour. En haut de la figure, la configuration à gorges pré-usinées. En bas, la configuration tubulaire.

Tableau I.1. Comparatif entre la géométrie à gorges pré-usinés et tubulaire pour la mise en œuvre de la coupe orthogonale sur un tour.

Aspect	Type de géométrie	
	A gorges pré-usinées	Tubulaire
Préparation de la pièce	Préparation des gorges : Opération délicate, qui demande des outils spéciaux et qui peut perturber le matériau, du fait des efforts et des températures mises en jeu, avant les essais de coupe orthogonale.	Découpage et dressage des pièces : opérations relativement simples et peu coûteuses.
Vitesse de coupe	La vitesse de coupe reste constante sur toute l'arête de coupe mais évolue es cours d'essai.	La vitesse de coupe n'est pas constante le long de l'arête de coupe mais reste constante au cours du temps.
Aspect dynamique	Possibilité d'utiliser une contrepointe afin de réduire les vibrations lors de l'usinage.	Impossible d'utiliser une contrepointe.
Surface obtenue	Surface usinée courbe : de grande dimension si le diamètre est important ou de forte courbure dans le cas contraire. Une découpe complexe est nécessaire afin de récupérer un échantillon de cette surface. Surface difficile à caractériser.	Surface usinée plane, favorable à la caractérisation microstructurale.

I.1.3. L'OUTIL DE COUPE

L'outil de coupe peut être défini comme l'élément directement responsable de l'enlèvement de la matière lors de l'usinage. Quatre paramètres principaux déterminent le domaine d'utilisation des outils : la géométrie, le matériau du substrat, le type de revêtement et les conditions de lubrification. Dans cette étude une géométrie d'outil simplifiée pour le cas de la coupe orthogonale sera présentée. Les matériaux des substrats et les types de revêtements utilisés pour l'usinage du titane et ses alliages seront présentés dans le paragraphe I.3.4.

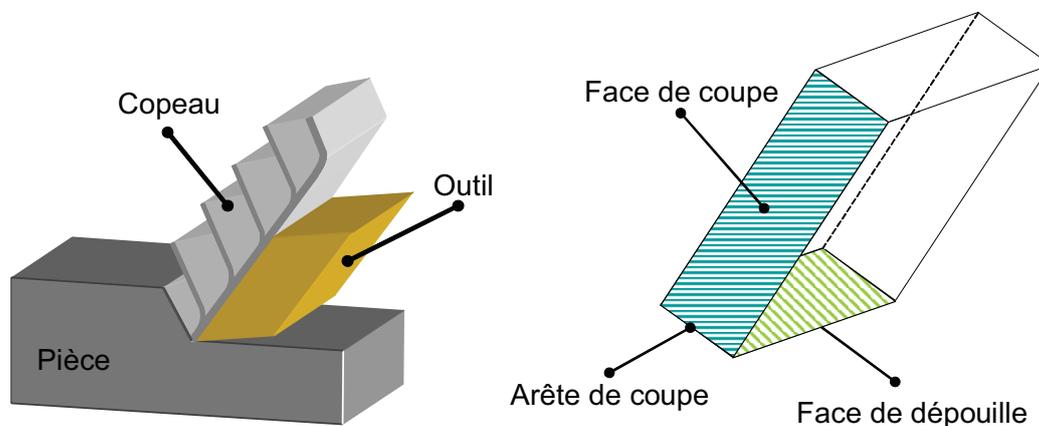


Figure I.4. Géométrie d'un outil simple.

Un outil de coupe est défini par deux plans : la face de coupe et la face de dépouille. L'intersection de ces deux plans constitue l'arête de coupe. En réalité ces deux plans sont reliés par le rayon de bec R de l'arête de coupe, mais il est généralement négligé dans l'étude de la coupe orthogonale, tel que le montre la figure I.4.

Trois angles, dont la somme est égale à 90° , sont nécessaires pour définir les caractéristiques géométriques d'un outil comme il est présenté sur la figure I.5 :

Angle de coupe (γ_o) : c'est l'angle entre la face de coupe et un plan de référence P (perpendiculaire à la direction d'usinage). L'angle de coupe affecte la capacité de l'outil à cisailer le matériau à usiner. Il peut être positif, négatif ou nul. Les angles de coupe positifs réduisent les efforts de coupe, tandis que des angles de coupe négatifs apportent de la robustesse à l'arête de coupe de l'outil [Leroy 1993]. Sa valeur se trouve généralement entre -5° et $+5^\circ$, quelque fois entre -10° et $+10^\circ$ et plus rarement entre -20° et $+20^\circ$.

Angle de dépouille (α_o) : c'est l'angle entre la face de dépouille et la surface usinée. Sa valeur, nécessairement positive, oscille généralement entre 2° et 10° .

Angle de taillant (β_o) : c'est l'angle entre la face de coupe et la face de dépouille.

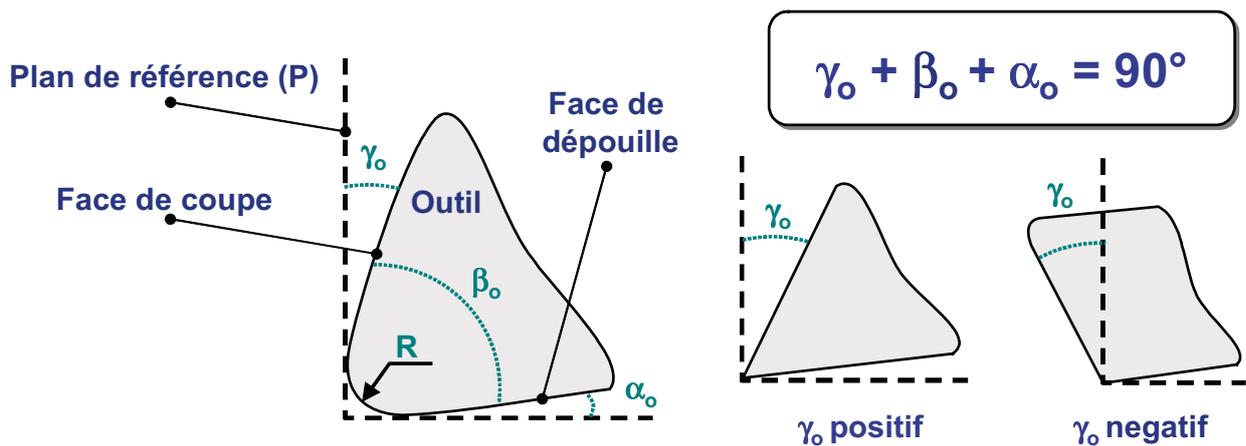


Figure I.5. Angles de coupe d'un outil simple.

I.1.4. ÉTUDE THERMIQUE DE LA COUPE

Lors de l'usinage des métaux, la plupart de l'énergie dépensée au cours de la déformation plastique est transformée en chaleur [Komanduri 1993]. Cette chaleur est dissipée par tous les éléments participants à la coupe : l'outil, la pièce usinée, le copeau et le fluide de coupe (si utilisé) [Bacci da Silva 1999]. Si l'on s'intéresse à l'outil, il est possible de voir qu'il doit supporter des hautes températures tout en conservant une résistance aux efforts ainsi qu'un état d'usure raisonnable. Il semble alors évident que la température atteinte dans l'outil déterminera sa durée de vie et sera un facteur décisif dans le choix des conditions de coupe.

Si on analyse de près l'interface outil-copeau, la quasi totalité de la chaleur générée est due à la déformation plastique lors de la formation du copeau et au frottement avec l'outil de coupe lors de son évacuation. Dans le cas de l'usinage à grande vitesse, cette chaleur est

majoritairement évacuée dans le copeau, tandis qu'une faible proportion est dissipée par conduction dans le matériau devant l'outil. La proportion de chaleur dissipée par l'outil et le copeau est modifiée par le débit matière (volume de matière enlevé par unité de temps) qui dépend des paramètres de coupe. Cette proportion augmente pour des faibles débits matière et pour les petits angles de coupe, mais reste faible pour des débits de matière importants [Bacci da Silva 1999].

La figure I.6 montre les trois principales zones de génération de la chaleur dans le cas de la coupe orthogonale. La chaleur est produite dans la zone de cisaillement primaire due au travail plastique effectué dans le plan de cisaillement. Les hautes températures dans cette zone entraînent un adoucissement local du matériau ce qui permet une déformation plus importante. Simultanément, de la chaleur est générée dans la zone de cisaillement secondaire, due notamment au frottement entre la face de coupe de l'outil et le copeau. La chaleur produite dans la zone de cisaillement tertiaire, à l'interface outil-surface usinée, est produite par les frottements de la face de dépouille de l'outil avec la surface usinée. La génération de chaleur et les températures atteintes dans les zones primaire et secondaire de cisaillement dépendent fortement des paramètres d'usinage, tandis que dans la zone tertiaire la chaleur générée est fortement influencée par l'angle de dépouille de l'outil à cause du retour élastique de la matière après le passage de l'outil de coupe.

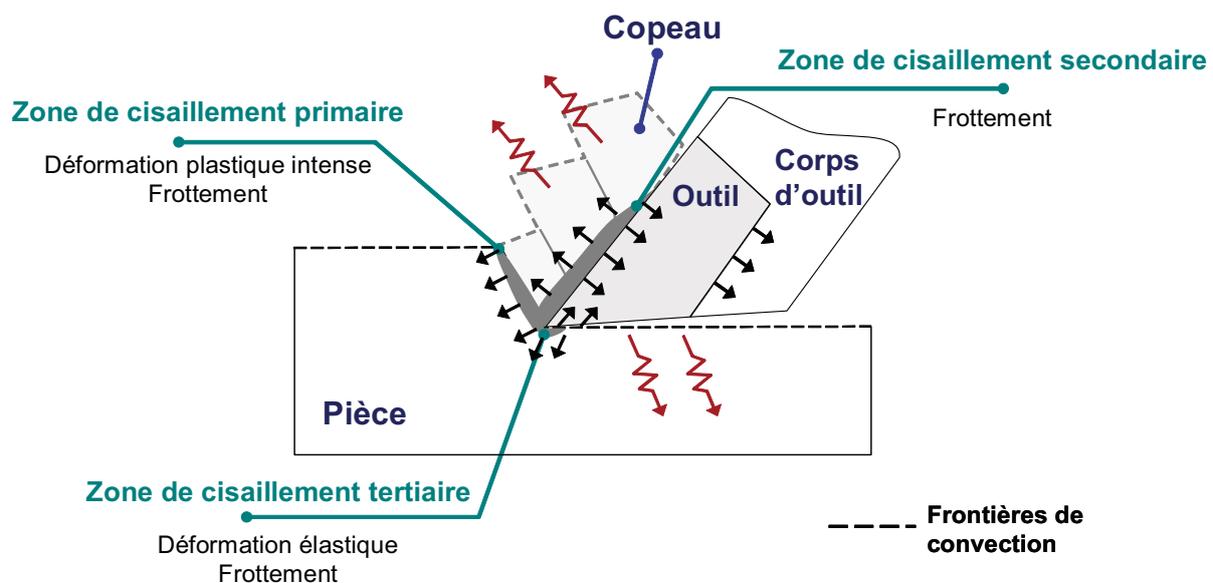


Figure I.6. Sources de génération de chaleur dans la coupe orthogonale [Bacci da Silva 1999].

Comme le montre la figure I.6, une partie de la chaleur générée à l'interface outil-copeau est aussi dissipée dans le corps de l'outil. Selon la température atteinte et le matériau du corps d'outil, une dilatation de quelques dizaines de microns peut avoir lieu, ce qui affecte la précision dimensionnelle de la pièce usinée [Childs 1988]. La déformation thermique du corps d'outil est de ce fait, considérée comme une source d'erreur dans les opérations d'usinage [Takeuchi 1982].

Le choix des conditions d'usinage est aussi influencé par le matériau à usiner. Certaines propriétés mécaniques, telles que la ductilité, la dureté, l'écroutissage, ainsi que les propriétés thermiques, ont des effets sur les efforts de coupe aussi bien que sur la chaleur générée. Le choix optimal des conditions de coupe, spécialement de la vitesse de coupe, aura une influence directe sur la déformation, les modifications métallurgiques et les contraintes

résiduelles dans la surface usinée. Cela dépendra de la température atteinte lors de l'usinage, des gradients de température sous la surface usinée et de la vitesse de refroidissement [Komanduri 1993].

I.1.5. ÉTUDE DES COPEAUX OBTENUS EN USINAGE

I.1.5.1. Intérêt de l'étude des copeaux obtenus en usinage à grande vitesse

La formation du copeau en usinage à grande vitesse est un phénomène micro-géométrique influant sur plusieurs grandeurs macro-géométriques liées à la qualité de la pièce obtenue [Burns 2002]. Sa maîtrise contribue à :

- fiabiliser le processus d'usinage,
- garantir la qualité géométrique des surfaces usinées, (l'état de surface, la précision dimensionnelle, etc.),
- assurer la productivité,
- renforcer la sécurité des opérateurs et de la cellule d'usinage.

Traditionnellement, d'abondantes recherches réalisées sur l'usinage des métaux se sont concentrées sur les mécanismes qui mènent à la formation des copeaux continus. Ces copeaux permettent de faire de nombreuses simplifications en raison de sa géométrie relativement simple et par les conditions d'obtention relativement stables. Toutefois, un copeau continu est fortement indésirable en usinage [Semiantin 1983], [Bayoumi 1995], [Xie 1996]. Par exemple, en tournage ce type de copeau peut perturber le procédé en s'enroulant autour de la pièce usinée. Il peut ainsi endommager la surface usinée, l'outil de coupe, la machine ou même blesser l'utilisateur [Sorby 2003]. L'enroulement du copeau peut même obliger à arrêter la machine afin de procéder à son enlèvement manuel, ce qui évidemment réduit la productivité du procédé. L'obtention d'un copeau segmenté, facilement cassant, peut être considérée comme une condition idéale pour un procédé d'usinage automatisé. L'usinage dans ces conditions peut entraîner une diminution de l'intervention humaine, ainsi qu'une réduction des efforts de coupe [Molinari 2002] et une meilleure gestion des copeaux, ce qui conduit à une augmentation du rendement du procédé et à une réduction des coûts de production.

I.1.5.2. Types de copeaux obtenus en usinage

Depuis des années, beaucoup d'efforts ont été réalisés afin de classer les différents types de copeaux obtenus en usinage, notamment dans le cas de la coupe orthogonale. Ernst en 1938, un des précurseurs dans le domaine, a proposé un classement des copeaux toujours utilisé de nos jours [Ernst 1938]. Ce classement comporte trois catégories de copeaux :

Copeau continu : sa formation est due à un écoulement constant de la matière dans lequel les contraintes, la déformation, la vitesse de déformation et la température restent constantes tout au long de la coupe (fig. I.7 (i)).

Copeau continu avec arête rapportée : c'est le résultat d'un état d'équilibre dynamique d'un système contenant une zone de stagnation (fig. I.7 (ii)). La tendance à la formation d'arête rapportée lors de l'usinage diminue avec l'augmentation de la vitesse de coupe.

Copeau discontinu : il se caractérise par des profils d'écoulement oscillatoire de la matière lors de la coupe (fig. I.7 (iii)).

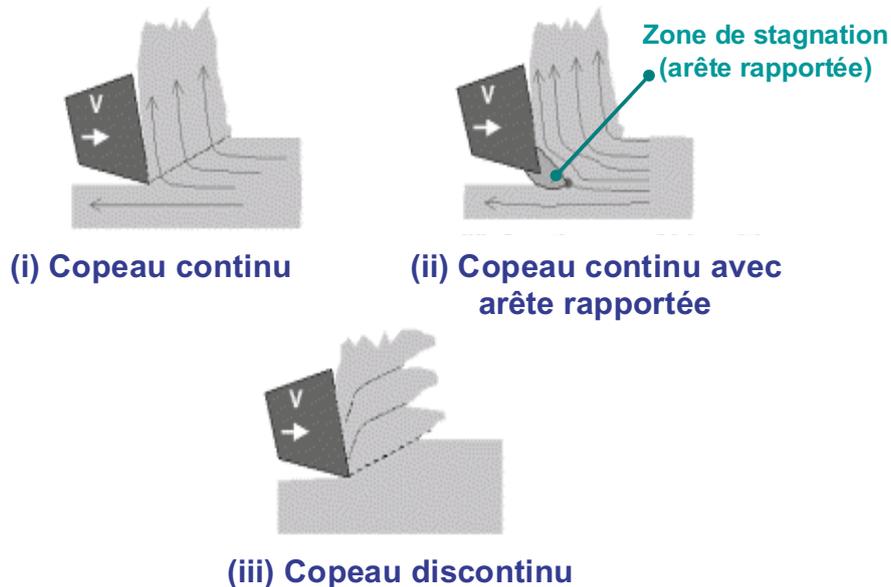


Figure I.7. Classification d'Ernst des différents types de copeaux [Burns 2002].

En usinage à grande vitesse, la formation des copeaux est affectée par des instabilités qui apparaissent avec l'augmentation de la vitesse lors de la coupe. Les sources d'instabilité peuvent être de diverse nature [Komanduri 1982-A] :

- les caractéristiques métallurgiques et thermo-plastiques du matériau usiné,
- les conditions de coupe,
- les variations du cisaillement dans la zone de cisaillement primaire,
- l'usure de l'outil qui entraîne des variations des conditions de frottement dans la zone de cisaillement secondaire,
- les interactions entre les zones de cisaillement primaire et secondaire,
- la réponse de la structure de la machine et ses interactions avec le procédé de coupe.

Le résultat de ces instabilités est la formation de copeaux discontinus. Ces types de copeaux peuvent être obtenus avec des conditions de coupe et des matériaux différents. Komanduri propose un classement des copeaux discontinus, illustré par la figure I.8 [Komanduri 1982-A] :

Copeau segmenté périodique : c'est un copeau qui présente une variation périodique mais asymétrique de l'épaisseur. Il ne se présente que pour des intervalles de vitesses particuliers qui dépendent du matériau à usiner et du dispositif expérimental.

Copeau avec cisaillement localisé (ou dentelé) : ce type de copeau est dû principalement à une instabilité de la déformation plastique localisée dans la zone de cisaillement primaire.

Copeau fragmenté : il est similaire au copeau segmenté périodique mais avec une séparation complète des segments. C'est le résultat de la rupture périodique du copeau dans la zone de cisaillement primaire. Ce type de copeau se présente principalement dans l'usinage de matériaux fragiles.

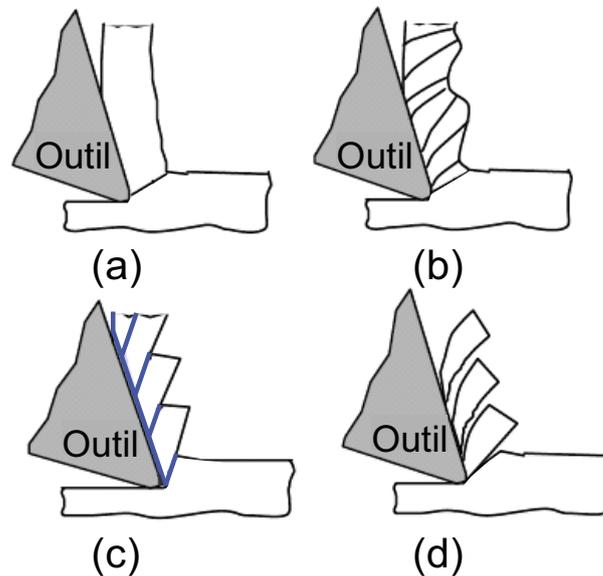


Figure I.8. Morphologie des copeaux obtenus en usinage : continu (a), segmenté périodique (b), avec cisaillement adiabatique (c) et discontinu (d) [Deshayes 2004].

I.1.5.3. L'observation des copeaux : une autre façon de définir l'usinage à grande vitesse

Au début de ce chapitre, une définition très générale de l'usinage à grande vitesse a été donnée, liée aux conditions de coupe. L'UGV a alors été défini comme un procédé pour lequel les conditions de coupe sont « très supérieures à celles utilisées en usinage conventionnel ». Une autre définition peut être établie si l'on s'intéresse cette fois-ci aux copeaux obtenus. En effet, les paramètres de coupe peuvent modifier la géométrie du copeau et les mécanismes physiques conduisant à sa formation. Afin d'illustrer ces modifications, prenons le cas d'un métal ductile quelconque, usiné à différentes vitesses de coupe¹ :

- Pour de faibles vitesses de coupe le copeau obtenu est un long ruban de métal continu qui présente une épaisseur constante. Il est considéré que ce type de copeau est obtenu par un cisaillement simple de la matière.
- L'augmentation de la vitesse de coupe entraîne des modifications dans le comportement du matériau. Les grandes vitesses de déformation et les hautes températures dans la zone de cisaillement primaire conduisent à une localisation de la

¹ Dans cet exemple la description des mécanismes de formation des copeaux ne prétend pas être exhaustive ni détaillée. L'influence de la vitesse de coupe sur la transition du copeau continu au copeau dentelé est donnée à titre indicatif et l'influence des autres paramètres de coupe n'est pas discutée. Pour des renseignements approfondis à ce sujet le lecteur intéressé pourra consulter notamment les travaux de Barry et al. [Barry 2001], [Barry 2002-A], Davies et Burns [Davies 2001] ainsi que ceux de Deshayes et al. [Deshayes 2004].

déformation dans des bandes de cisaillement, se traduisant par une géométrie de copeau très particulière de type dentelé.

Il devient alors possible de parler d'usinage à grande vitesse lorsqu'on obtient des copeaux dentelés, et cela pour un matériau, des conditions de coupe et un dispositif expérimental donnés.

I.1.6. THEORIES SUR LA FORMATION DU COPEAU EN USINAGE A GRANDE VITESSE

Historiquement deux théories concernant les mécanismes de formation des copeaux dentelés en usinage à grande vitesse ont été largement discutées. Ces théories sont le *cisaillement catastrophique* et la formation périodique de fissures dans la zone de cisaillement primaire.

D'autre part, d'autres théories concernant la formation des copeaux en usinage ont été également proposées. On évoque notamment celles de Van Luttervelt [Van Luttervelt 1977] et de Lemaire et Backofen [Lemaire 1972]. Cependant, ces théories ont été développées sur des essais d'usinage à faible vitesse de coupe (quelques mm/s), et ne semblent pas applicables à la formation de copeaux à des vitesses de coupe conventionnelles [Barry 2002-A].

I.1.6.1. Le cisaillement adiabatique catastrophique

Il est admis que lors de la déformation plastique, les métaux ductiles présentent un phénomène d'écrouissage. Dans le cas de l'usinage à faible vitesse de coupe, la matière subit un écrouissage dans la zone de cisaillement primaire accompagné de la propagation du front thermique devant l'outil vers le matériau non coupé [Burns 2002].

Lorsque la vitesse de déformation augmente, les matériaux réagissent différemment aux sollicitations imposées. Dans le cas de l'usinage, l'essentiel de la déformation se concentre dans la zone de cisaillement primaire, ce qui produit un important écrouissage local de la matière. En même temps, la plupart de l'énergie de déformation plastique mise en œuvre lors de la coupe se transforme en énergie thermique, ce qui conduit à une augmentation de la température du matériau dans cette zone. Du fait de la vitesse de déformation importante, une faible proportion de la chaleur générée dans cette zone est évacuée par les différents éléments intervenant dans la coupe (l'outil, le copeau et la pièce). De ce fait les propriétés mécaniques du matériau sont modifiées et la résistance mécanique diminue. Ce phénomène est appelé *adoucissement thermique*.

Le cisaillement catastrophique se présente quand le taux d'adoucissement thermique dépasse le taux d'écrouissage dans la zone de cisaillement primaire. Cela entraîne une localisation de la déformation dans des zones très étroites, qui se retrouvent dans le copeau sous la forme de bandes de cisaillement. Le terme « *cisaillement adiabatique* » est utilisé dans la littérature pour désigner ce phénomène, du fait des très forts gradients de température ayant lieu dans la zone de cisaillement primaire pendant des intervalles de temps très courts, raison pour laquelle il y a peu de transfert thermique.

I.1.6.2. Théorie de la formation périodique de fissures

Si la plupart des auteurs soutiennent la théorie du cisaillement catastrophique [Barry 2002-A], d'autres théories tentent d'expliquer différemment la formation des copeaux dentelés. Certains auteurs affirment que la formation des copeaux dentelés est le résultat de l'initiation périodique de fissures dans la surface libre du matériau usiné², et sa propagation dans la zone de cisaillement primaire vers l'arête de coupe de l'outil [Nakayama 1974], [Vyas 1993], [Poulachon 1998], [Shaw 1998], [Vyas 1999], [Shivpuri 2002], [Hua 2004], [Poulachon 2004].

La formation de copeaux dans l'usinage des aciers durs a été décrite par Poulachon et Moisan comme un procédé en quatre phases, présentées en figure I.9 [Poulachon 1998], [Poulachon 2004] :

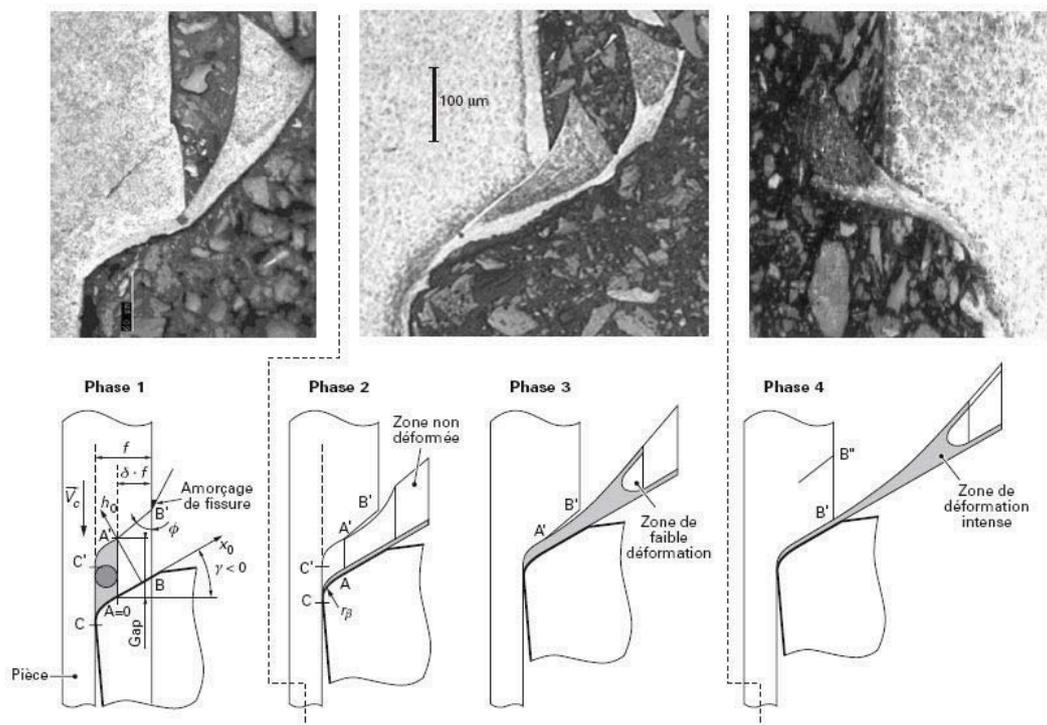


Figure I.9. Phases de la formation des copeaux dentelés, selon Poulachon et Moisan (dans le schéma l'usinage s'effectue avec un angle de coupe négatif) [Poulachon 2004].

- **1^{ère} phase** : lorsque la contrainte critique de cisaillement est atteinte, une première fissure apparaît. Celle-ci se développe dans la zone de cisaillement primaire en direction de l'arête de l'outil.
- **2^{ème} phase** : suite à l'apparition de la fissure, le segment du copeau en formation (volume AA'BB') est éjecté pratiquement sans aucune déformation. Au fur et à mesure que l'outil avance, le gap AA' se referme. Le glissement du copeau sur la surface de coupe de l'outil génère une augmentation importante de la température dans cette zone.

² D'autres auteurs, soutenant la théorie de formation des copeaux dentelés par la formation périodique de fissures, indiquent que ces dernières se forment dans la zone primaire de cisaillement et se propagent dans la direction de cisaillement, et non depuis la surface libre de la pièce [Hua 2004].

- **3^{ème} phase** : Le gap AA' est pratiquement fermé et laisse peu de place à l'évacuation du copeau restant. A ce stade, la vitesse d'éjection, la déformation plastique et la température sont très intenses.
- **4^{ème} phase** : le segment du copeau est formé et comble pratiquement tout l'espace libre qui existait entre la fissure et le copeau. Le champ de contrainte de compression qui avait chuté entre les étapes 2 et 3 redevient très élevé, au point de générer une nouvelle fissure, et le phénomène cyclique recommence.

I.1.7. LES BANDES DE CISAILLEMENT ADIABATIQUE

Comme nous l'avons indiqué, le *cisaillement adiabatique* est le terme utilisé pour décrire la localisation de l'écoulement plastique qui apparaît dans certains métaux lorsqu'ils sont soumis à des taux de déformation très élevés, lorsque les échanges de chaleur peuvent être négligeables [Timothy 1987].

Les bandes de cisaillement adiabatique sont présentes dans des procédés de torsion-compression à grande vitesse [Liao 1998], les impacts balistiques [Woodward 1979], [Me-Bar 1983], [Grebe 1985], [Timothy 1985], l'usinage à grande vitesse [Komanduri 1981], [Komanduri 1982-A], [Komanduri 1982-B], [Semiantin 1983], [Barry 2001], [Molinari 2002], [Burns 2002], et dans l'expansion d'anneaux [Timothy 1987]. Elles se manifestent par des zones de cisaillement très élevé et/ou des modifications microstructurales locales du matériau [Timothy 1987]. Historiquement, elles ont été classées comme « *déformées* » ou « *transformées* », en fonction de leur apparence métallographique [Timothy 1987].

I.1.7.1. Bandes de cisaillement déformées

Les bandes de cisaillement déformées s'associent à des zones à forte déformation plastique, tout en conservant la nature microstructurale du matériau de départ [Timothy 1985], comme le montre la figure I.10. Dans ce type de bandes, la déformation est généralement progressive et atteint son niveau maximal au centre géométrique de la bande.

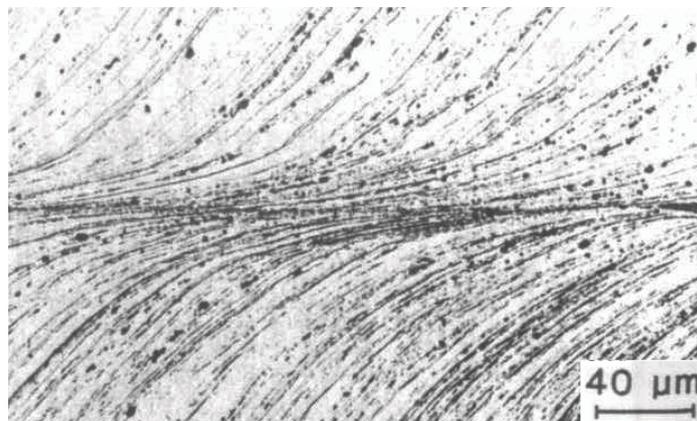


Figure I.10. Bande de cisaillement déformée dans un alliage d'aluminium 7039 [Leech 1985].

I.1.7.2. Bandes de cisaillement transformées

Une bande de cisaillement transformée est composée généralement de deux zones : une zone centrale où le cisaillement intense est accompagné d'importantes modifications microstructurales du matériau de départ et où il prédomine une seule phase et une zone extérieure caractérisée par une diminution du taux de cisaillement jusqu'à atteindre le matériau non déformé [Timothy 1987]. Pour un matériau donné, la température atteinte dans une bande de cisaillement transformée est supérieure à celle atteinte dans une bande de type déformée [Timothy 1987]. La figure I.11 montre un acier AISI 4340, présentant une bande de cisaillement transformée obtenue par un essai d'impact.

Ce type de bandes est associé à des modifications permanentes de la microstructure avec des transformations de phase, généralement de type martensitique [Timothy 1987]. En usinage, cette transformation est la conséquence des forts gradients de température dans la zone de cisaillement primaire. Ces chargements thermiques peuvent être assimilés à des conditions de trempe locale du matériau.

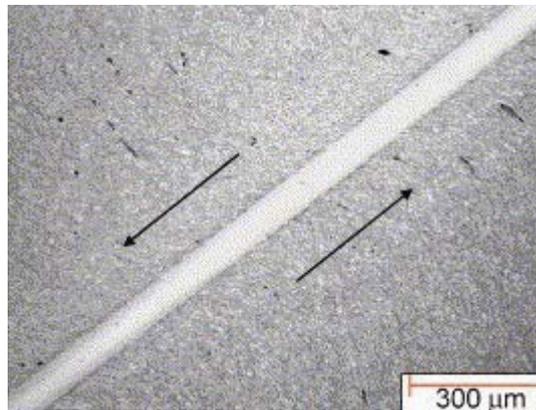


Figure I.11. Bande de cisaillement transformée dans un acier AISI 4340, obtenue par un essai d'impact (les flèches montrent la direction de la déformation plastique) [Odeshi 2006].

I.1.8. INTEGRITE DE SURFACE

En général, les pièces mécaniques sont soumises à des conditions d'utilisation de plus en plus sévères. Les besoins accrus en terme de performance, de durée de vie et de fiabilité, obligent à garantir la qualité des pièces produites, quelque soit le procédé de fabrication utilisé. Ces pièces sont souvent utilisées sous des chargements dynamiques et selon leur conception, leur durée de vie est limitée par la réponse en fatigue du matériau utilisé. L'expérience montre que la plupart des défaillances de pièces soumises à des chargements dynamiques sont engendrés en surface [Field 1973]. De plus, le rôle fondamental de la surface de la pièce, concernant la tenue à la corrosion a aussi été prouvé. Tous ces aspects montrent l'importance d'assurer une haute qualité des surfaces obtenues par usinage.

Dans ce contexte, deux définitions de la surface doivent être faites :

- **Surface réelle de la pièce** : c'est la surface qui sépare la pièce de l'environnement.

- **Couche de surface** : c'est la partie de la surface de la pièce qui présente des propriétés physiques et chimiques différentes de celles du cœur de la pièce. Par la suite, on retiendra cette dernière définition.

I.1.8.1. Définition générale

Le terme *intégrité de surface* englobe l'ensemble des paramètres permettant de caractériser la qualité d'une surface produite par usinage. Elle se compose de deux principaux aspects : la caractérisation géométrique et la caractérisation métallurgique de la couche de surface après usinage.

Parmi les altérations possibles associées à l'usinage, affectant l'intégrité de surface, on trouve [Field 1973] :

- la déformation plastique,
- l'obtention d'un mauvais état de surface,
- des phénomènes de recristallisation,
- la modification de la dureté en surface,
- des transformations de phase,
- l'apparition de microfissures,
- un état des contraintes résiduelles en surface non adapté au fonctionnement de la pièce,
- la fragilisation par absorption chimique d'éléments tel l'hydrogène.

Ces altérations, générées lors de l'usinage, sont provoquées principalement par les hautes températures et les forts gradients de température engendrés dans la couche de surface, ainsi que par l'intense déformation plastique et les éventuelles réactions chimiques ayant lieu sur la surface en cours de formation.

I.1.8.2. Paramètres caractérisant l'intégrité de surface

Les paramètres les plus fréquemment étudiés, permettant de caractériser l'intégrité de surface peuvent être regroupés en deux catégories : ceux permettant de caractériser géométriquement la surface usinée, et ceux permettant de caractériser microstructuralement la couche de surface obtenue. Parmi les paramètres importants au niveau géométrique, il est possible de citer l'état de surface, ainsi que le respect des tolérances dimensionnelles et géométriques. En ce qui concerne les paramètres utilisés pour la caractérisation microstructurale de la surface produite, on retient notamment la texture cristallographique, l'état de contraintes résiduelles, les modifications morphologiques des grains constituant la surface, l'analyse de phases (permettant de retrouver des phénomènes comme les transformations de phase et des réactions chimiques en surface), ainsi que la dureté et la microdureté.

Du fait du caractère surfacique des sollicitations thermomécaniques imposées aux matériaux lors de l'usinage, de forts gradients microstructuraux sont engendrés dans la couche de surface produite. Cet aspect doit être pris en compte lors de la caractérisation des surfaces produites afin d'assurer une meilleure compréhension et une bonne maîtrise de l'intégrité de surface des pièces usinées.