

Travail mécanique du bois

Lois générales de l'usinage

par **Jacques JUAN**

Ingénieur des Arts et Métiers

Chef de section au Centre Technique du Bois et de l'Ameublement (CTBA)

1. Outil	B 7 305 - 2
1.1 Mouvements de la pièce et de l'outil	— 2
1.2 Géométrie de la dent.....	— 3
1.2.1 Arête de coupe.....	— 3
1.2.2 Angles.....	— 4
1.2.3 Influence des angles de l'outil	— 4
1.3 Qualités attendues d'un outil.....	— 5
1.4 Matériaux de coupe.....	— 5
1.4.1 Aciers.....	— 5
1.4.2 Alliages chrome-cobalt	— 6
1.4.3 Carbures de tungstène	— 6
1.4.4 Diamant polycristallin	— 8
1.4.5 Céramiques	— 8
1.4.6 Choix du matériau de coupe.....	— 8
1.5 Conceptions d'outils.....	— 9
1.5.1 Outils monomatériaux	— 9
1.5.2 Outils multimatériaux.....	— 9
1.5.3 Choix de la conception de l'outil	— 10
2. Copeau	— 11
2.1 Directions de coupe.....	— 11
2.2 Efforts de coupe.....	— 11
2.3 Géométrie du copeau.....	— 12
2.4 Traces d'usinage	— 15
2.5 Formation du copeau	— 16
2.5.1 Formation du copeau dans le bois massif.....	— 16
2.5.2 Formation du copeau dans les panneaux	— 18
2.6 Puissance.....	— 19
3. Usure des arêtes tranchantes.....	— 20
3.1 Origines de l'usure	— 20
3.2 Formes d'usure	— 20
3.3 Conséquences de l'usure.....	— 20
3.4 Comment limiter l'usure	— 21
Pour en savoir plus.....	Doc. B 7 309

Dans la très grande majorité des cas, l'objectif d'une opération d'usinage est d'obtenir un **état de surface acceptable, dans le respect des dimensions fixées**. Cet état de surface peut être imposé pour des raisons d'esthétique, mais aussi parfois pour des raisons techniques. On sait, par exemple, que la résistance d'un assemblage collé est tributaire de la qualité des surfaces en contact.

Dans cet article, nous nous limiterons à l'examen des modes d'usinage les plus fréquents et qui ont des conséquences souvent importantes sur l'état de surface : les trajectoires trochoïdales.

1. Outil

1.1 Mouvements de la pièce et de l’outil

La pénétration d’un outil dans une pièce n’est possible que s’il est animé d’un mouvement avec une énergie suffisante. Ce **mouvement de coupe** peut être **affecté à l’outil**, c’est le cas le plus fréquent (sciage, fraisage, perçage, etc.), mais aussi, **quelquefois, à la pièce** (tournage, déroulage, tranchage, par exemple).

- Ce mouvement de coupe peut être :
- *rectiligne* : outils à main, scie à ruban, scie alternative ;
 - *circulaire* : mouvement de la quasi-totalité des outils à bois ;
 - *complexe* : cas de certains bédanes à mortaiser.

La vitesse de coupe v_c correspond à la vitesse linéaire de l’arête de coupe de l’outil par rapport à la pièce. Chaque matériau travaillé (bois, métal, plastique, etc.) doit être usiné avec une vitesse adaptée à ses propres caractéristiques. Le matériau de l’outil intervient également dans la détermination de cette vitesse, les matières usinées tendres permettant l’utilisation de vitesses de coupe plus élevées que les matières dures. Pour le bois, les études faites avec des outils en excellent état ont montré qu’une variation de la vitesse de coupe de 5 à 90 m/s avait peu d’influence sur la formation du copeau. L’expérience prouve toutefois que la capacité de coupe d’un outil au tranchant imparfait est améliorée, dans une certaine mesure, par l’accroissement de la vitesse. Mais, en contrepartie, l’usure augmente avec la vitesse de coupe. C’est pourquoi il est raisonnable de se fixer une **vitesse moyenne de 50 m/s**, avec la possibilité de la réduire légèrement (40 m/s) pour des outils peu résistants à l’usure ou pour des matériaux usinés durs, et l’augmenter un peu (60 à 70 m/s) pour des matériaux de coupe plus résistants ou pour des matériaux tendres.

Après chaque détachement de copeau, il est nécessaire de repositionner l’outil par rapport à la pièce, ou l’inverse. C’est le rôle dévolu au mouvement d’avance.

- Le **mouvement d’avance** pourra être **appliqué** :
- **à la pièce** : rabotage, sciage (souvent), perçage (parfois), etc. ;
 - **à l’outil** : tournage, sciage (parfois), etc. ;
 - **aux deux** : défonçage lorsque la pièce se déplace en X et l’outil en Y.

Ce mouvement est le plus souvent animé d’une vitesse continue v_f , mais quelques formes d’usinage ont un mouvement d’avance discontinu.

En fait, **vitesse de coupe et vitesse d’avance sont indissociables**. En effet, la vitesse de coupe exacte est la vitesse relative de la dent par rapport à la pièce. Elle est égale à la somme vectorielle des deux vitesses : si elles sont de même sens, elles s’additionnent et si elles sont de signes contraires, elles se retranchent. Compte tenu de leurs valeurs moyennes respectives (v_c de l’ordre de 50 m/s et v_f dépassant rarement 100 m/min soit ≈ 2 m/s), il est en général possible de négliger l’influence de la vitesse d’avance sur la vitesse de coupe.

Exemple

$$v_c = 50 \text{ m/s et } v_f = 60 \text{ m/min}$$
$$v_{\text{coupe réelle}} = 50 \pm 60/60 = 50 \pm 1 \text{ m/s}$$

En considérant que la vitesse de coupe est de 50 m/s, on commet une erreur de 1 m/s (soit 2 %), ce qui est tout à fait négligeable. Bien sûr, cette approximation n’est plus acceptable lorsque la vitesse de coupe est très faible.

La **trajectoire de l’arête de coupe par rapport à la pièce** est la combinaison de ces deux mouvements (tableau 1). Cette trajectoire est matérialisée par les traces que l’on aperçoit parfois sur la surface usinée. On ne doit pas les considérer comme des défauts d’usinage, car elles résultent uniquement du mode d’usinage choisi.

Tableau 1 – Trajectoires de l’outil par rapport à la pièce					
Mouvement de coupe		Mouvement d’avance		Trajectoire	Exemples de modes d’usinage
Circulaire (v_c constante)	outil	Rectiligne	pièce	trochoïde	rabotage sciage circulaire fraisage
				hélice	perçage
		Circulaire et rectiligne	pièce outil	complexe	tournage de torsades
		Rectiligne ou rectiligne	outil pièce	trochoïde	défonçage mortaisage à mèche
Circulaire (v_c constante)	pièce	Rectiligne	outil	spirale	déroulage tournage par plongée
				hélice	tournage par chariotage
Rectiligne (v_c constante)	outil	Rectiligne	pièce	droite	sciage ruban
Rectiligne (v_c sinusoïdale)	outil	Rectiligne	pièce	complexe	sciage alternatif
Complexe	outil	Rectiligne	pièce	complexe	mortaisage a bédane

Ces trajectoires peuvent aisément se mettre en équation dans la mesure où les mouvements de l'outil et de la pièce sont connus. On obtient, par exemple, les équations suivantes (présentées sous forme paramétrique) :

— *trajectoire droite* :

$$x = 1\,000\, v_f t/60$$

$$y = 1\,000\, v_c t$$

— *trajectoire cycloïde allongée, dite trochoïde* :

• travail en opposition :

$$x = R \sin(2\pi Nt/60) + 1\,000\, v_f t/60$$

$$y = R \cos(2\pi Nt/60)$$

• travail en avalant :

$$x = -R \sin(2\pi Nt/60) + 1\,000\, v_f t/60$$

$$y = R \cos(2\pi Nt/60)$$

avec N (tr/min) vitesse de rotation,
 R (mm) rayon de l'outil,
 v_c (m/s) vitesse de coupe,
 v_f (m/min) vitesse d'avance,
 t (s) temps.

On travaille en opposition ou en avalant selon que les mouvements de coupe et d'avance sont de sens opposés ou identiques (figure 1).

■ **Travail en opposition** (figure 1a) : ce mode de travail, où les **mouvements de coupe et d'avance** sont **contraires**, est exigé pour toutes les opérations manuelles car c'est celui qui offre la meilleure sécurité. En effet, si lors de l'usinage, la vitesse d'avance croît, les efforts de coupe dont la direction s'oppose à celle-ci vont croître également et vont avoir tendance à réguler le mouvement.

De plus, si à cause de la présence d'une zone dure (nœud par exemple), l'effort de coupe augmente brutalement, cela peut se traduire par un mouvement de recul. Cet à-coup, dont l'impulsion est donnée par une dent, ne peut pas être amplifié par la dent suivante qui ne rencontre plus de matière sur sa trajectoire. Il ne faut pas toutefois sous-estimer ce danger, mais l'expérience prouve que peu d'accidents en résultent.

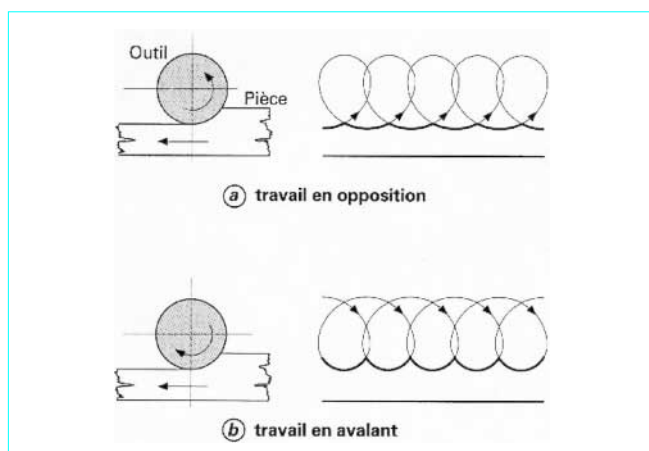


Figure 1 – Trajectoires des arêtes de coupe (trochoïdes) en opposition et en avalant

■ **Travail en avalant** (figure 1b) : on travaille en avalant (on dit également *en concordance*) lorsque les **vitesse de coupe et d'avance** sont **de même sens**. Ces **conditions de travail** sont **absolument interdites**, à l'exception des machines automatiques spécialement conçues pour de tels travaux.

De nombreux ouvriers sont chaque année victimes d'accidents aux mains pour avoir enfreint cette règle de sécurité. Le processus déclenchant l'accident est actuellement bien connu grâce à des études utilisant des caméras ultrarapides : lors de la pénétration d'une dent dans le bois, une composante de l'effort de coupe accélère légèrement le mouvement d'avance si la pièce n'est pas parfaitement maintenue. La dent suivante doit détacher un copeau un peu plus épais. L'effort de coupe est alors plus élevé, ce qui a pour effet d'accélérer encore le mouvement. Après quelques tours d'outil, le bois est entraîné à une vitesse qui peut approcher la vitesse de coupe (vitesse tangentielle de l'outil, soit plusieurs dizaines de mètres par seconde). Si la main de l'opérateur est proche (et en amont) de la broche porte-outil, tous les paramètres sont réunis pour qu'un accident grave se produise, entraînant souvent une amputation importante à la main gauche (lors du travail à la toupie). Si le toupilleur a pris la précaution de ne pas mettre sa main en amont de l'outil, la pièce est alors éjectée avec force et peut blesser quiconque se trouvant sur sa trajectoire. Bien sûr, tous les opérateurs connaissent ce danger, mais l'habitude émousse souvent cette nécessaire vigilance. De plus, les travaux arrêtés (moulures, rainures) réalisés à partir d'un tracé sont également à l'origine de nombreux accidents mutilants. Pour les éviter, différentes précautions sont à prendre.

Certains usinages se font à la fois en opposition et en avalant. C'est le cas de l'usinage de rainures avec des outils (mèches) montés en bout d'arbre de toupie ou de défonceuse. Mais le rejet est alors impossible car l'outil fait écran et empêche que la pièce soit éjectée.

1.2 Géométrie de la dent

La **dent** est un coin qui sépare la matière lors de sa pénétration. Elle est matérialisée par deux faces (souvent planes, parfois curvilignes) : une *face de coupe* (dite également *face d'attaque*) et une *face de dépouille*. L'intersection de ces deux faces définit l'*arête de coupe*. La face de coupe est celle sur laquelle vient glisser le copeau, la face de dépouille est celle le long de laquelle vient défilier la surface usinée. Il est fréquent que les outils aient plusieurs faces de dépouille (une principale, plusieurs secondaires), pour éviter les frottements (figure 2).

1.2.1 Arête de coupe

Cette arête de coupe peut être orientée de différentes façons (tableau 2) ; pour un outil tournant, elle peut être :

— *dans un plan passant par l'axe de rotation* : on parle alors de **coupe droite** (même si le profil réalisé est curviligne). Ces outils sont très nombreux : scies, outils de rabotage, nombreuses fraises, etc. ;

— *dans un plan perpendiculaire à l'axe de rotation* : la **coupe** est dite **fauchante ou arasante**. Ces dents interviennent souvent en passe de finition, pour supprimer des traces laissées par les dents droites. On les utilise pour des fraises à feuillures ou à rainures, ainsi que pour les fraises à plates-bandes ;

— *dans un plan incliné par rapport à l'axe de rotation* : la **coupe** est **biaise**. Elle favorise la formation du copeau, réduit le choc à l'attaque de la dent. Cette forme de dent ne peut s'envisager que lorsque la hauteur de coupe est limitée, en particulier parce qu'elle déforme le profil (une arête droite inclinée n'engendre pas un plan, mais une surface bombée). Cette déformation est d'autant plus accentuée que l'arête est longue, c'est pourquoi on ne trouve cette disposition que sur des fraises et quelques porte-outils à tenonner.

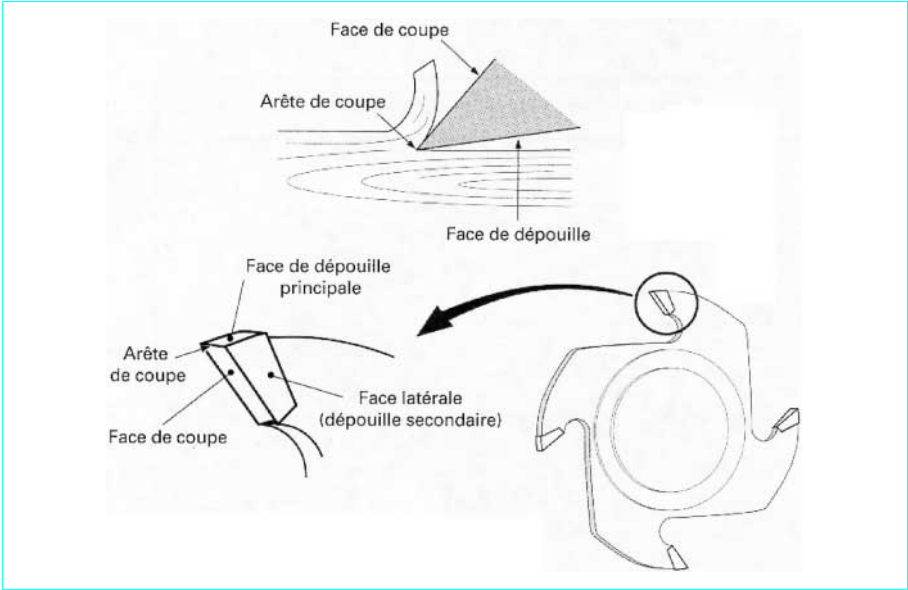


Figure 2 – Matérialisation d'une dent

Tableau 2 – Positions des arêtes de coupe		
Coupe droite		Arête dans un plan passant par l'axe de rotation de l'outil
Coupe biaise		Arête dans un plan quelconque par rapport à l'axe de rotation de l'outil
Coupe fauchante ou arasante		Arête dans un plan perpendiculaire à l'axe de rotation de l'outil

1.2.2 Angles

Les principaux angles qui définissent la géométrie de l'outil, d'après la norme NF E 66-503, sont les suivants (figure 3) :

- l'angle de coupe γ , couramment appelé *angle d'attaque*, est celui compris entre la face de coupe et le plan perpendiculaire à la direction de coupe ;
- l'angle de dépouille principale α est formé par la face de dépouille et la surface usinée ;
- l'angle de taillant β , souvent appelé *angle de bec*, est l'angle aigu défini par les faces de coupe et de dépouille.

Ces trois angles sont liés par la relation mathématique suivante :

$$\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ$$

dans laquelle β et α sont toujours positifs, γ pouvant être sur quelques outils négatif :

- l'angle d'inclinaison d'arête λ ;
- l'angle de direction d'arête χ ;
- d'autres angles de dépouille (latérale DL, radiale DR).

Lorsque la dent est engagée dans la matière, sa face de coupe fait un angle avec les fibres du bois ; on l'appelle *angle de levage* Φ . Cet angle n'est pas mesurable sur l'outil, car il est fonction, en plus de l'angle de coupe, de l'orientation des fibres et de la trajectoire de l'outil. Pour le rabotage, cet angle est défini par la formule approchée suivante :

$$\Phi = \gamma + \arccos [(R - h)/R] \pm i$$

selon les indications de la figure 4.

1.2.3 Influence des angles de l'outil

Cet aspect est traité en détail lors de la présentation de chaque type d'outil (article *Travail mécanique du bois. Principales opérations d'usinage* [B 7 306]). Toutefois, on peut considérer schématiquement que :

- l'angle de coupe est à l'origine de la formation du copeau : il est en grande partie responsable de l'état de surface engendrée, ainsi que du niveau d'énergie absorbée par la coupe. Il varie selon les outils de -10 à $+40^\circ$;
- l'angle de taillant confère à l'outil sa robustesse, sa capacité à absorber les efforts et les chocs. Des matériaux fragiles (diamant par exemple) requièrent un angle de 75° , alors que l'acier peut accepter un angle de 20° (cas extrême du déroulage) ;
- l'angle de dépouille principale évite le frottement ; il varie de 5 à 25° . Les angles de dépouille secondaire (latérale, radiale) sont souvent de l'ordre de 1 à 3° .

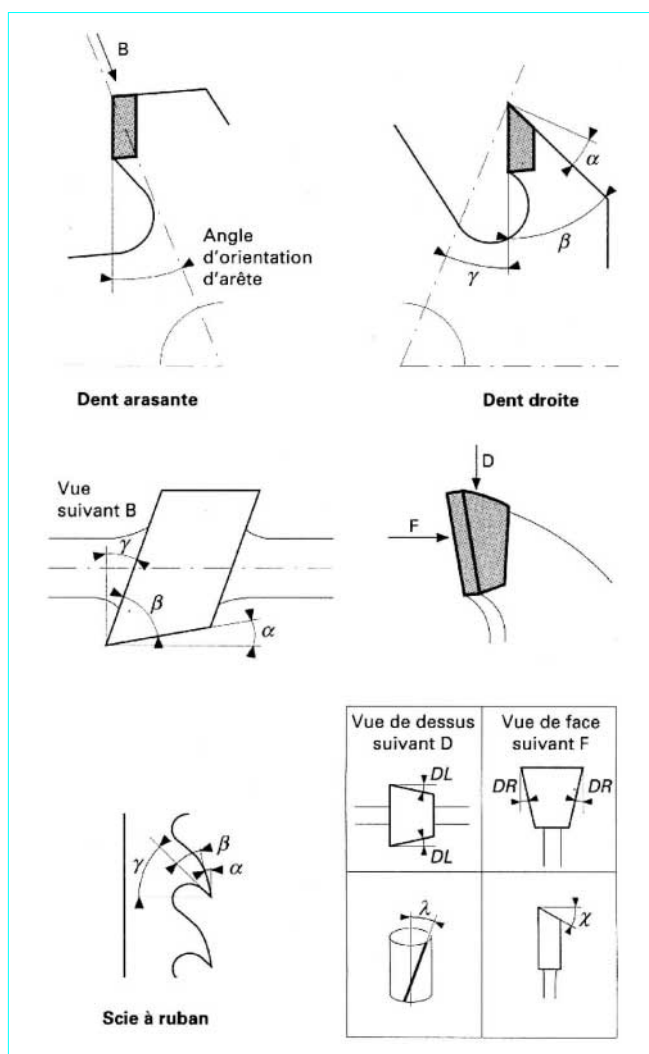


Figure 3 – Angles définissant la géométrie d'un outil

1.3 Qualités attendues d'un outil

Un outil est toujours composé de deux parties, distinctes ou non : le corps et la ou les parties tranchantes. Ces deux composantes doivent répondre à des exigences différentes.

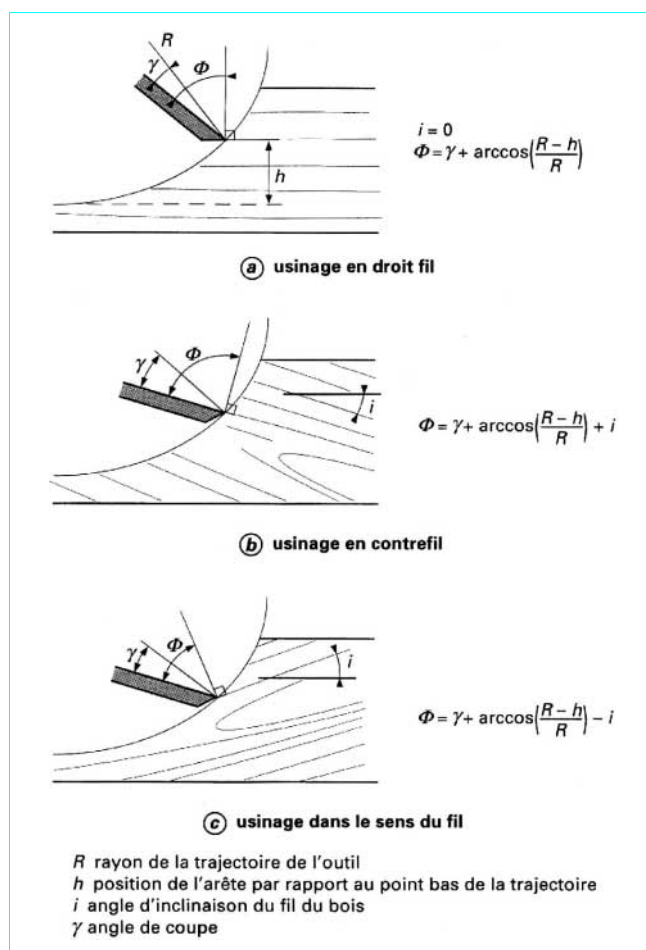
Au corps, on demande :

- de la rigidité, mais parfois de la souplesse (scie à ruban, par exemple) ;
- une bonne résistance à la fatigue ;
- de supporter sans rupture les efforts de coupe ;
- d'être brasable, si la fixation des dents l'exige ;
- une masse volumique limitée, surtout pour les outils de grande taille.

Pour la zone tranchante (dent ou couteau), on choisit un matériau :

- ayant un pouvoir tranchant élevé (finesse de l'arête de coupe) ;
- dur, résistant bien à l'usure ;
- suffisamment résistant pour supporter sans rupture ni déformation les efforts de coupe ;
- non fragile ;
- insensible à la corrosion.

D'autres facteurs (facilité d'entretien, prix, etc.) interviennent également dans le choix de ces matériaux.

Figure 4 – Angle de levage Φ pour le rabotage

1.4 Matériaux de coupe

La panoplie des matériaux actuellement disponibles est très vaste. Pourtant, seuls quelques-uns possèdent des qualités rendant possible la coupe du bois. Certains sont connus depuis longtemps déjà, d'autres ne font que commencer leur carrière.

Le lecteur pourra se reporter utilement, dans ce traité, à l'article *Matériaux pour outils de coupe* [BM 7 080] quant aux propriétés physiques de certains matériaux, ainsi qu'à l'article *Données numériques sur les aciers à outils* [M 330] dans le traité *Matériaux métalliques*.

1.4.1 Aciers

Utilisés depuis des temps très anciens, ils ont bénéficié de nombreuses améliorations qui leur permettent d'être encore utilisés de nos jours. Les aciers sont utilisés pour la confection d'outils, très souvent pour constituer le corps, assez fréquemment pour la partie tranchante. Pour cette dernière fonction, on utilise :

- des aciers au chrome (avec un pourcentage pouvant atteindre 12 %) ;
- des aciers rapides, dont la composition moyenne est :
 - carbone : 0,6 à 1,2 %,
 - chrome : 4 %,
 - tungstène : 10 à 18 %,
 - cobalt : 1,5 à 3 % ;

— des aciers surcarburés, qui sont des aciers rapides à haute teneur en carbone (1,5 à 1,8 %) et à taux de tungstène élevé (15 à 18 %).

La dureté moyenne des aciers à outils est de 40 à 50 HRC (indice de dureté Rockwell-cône), l'indice augmentant avec la dureté, et de 60 à 65 HRC pour les aciers rapides.

Les aciers ont pour principaux avantages :

- la finesse de l'arête de coupe, qui engendre un excellent pouvoir tranchant, donc une bonne qualité d'usinage ;
- une grande facilité d'entretien : l'affûtage peut se faire sans difficulté avec une meule vitrifiée ou, mieux, avec une meule *borazon* (nitrure de bore cubique), que ce soit à sec ou sous arrosage ;
- une bonne résistance aux chocs ;
- une mise en œuvre facile ;
- un prix très abordable.

Malheureusement, leur résistance mécanique est très altérée par l'élévation de température. Cela les prédispose à une usure d'origine mécanique rapide. Mais comme ils sont également sensibles à la corrosion physico-chimique et qu'ils sont électriquement très conducteurs, on comprend parfaitement que leur capacité à résister à l'usure est faible. La tenue de coupe (temps de fonctionnement de l'outil entre deux affûtages) étant un élément essentiel dans le calcul du prix de revient d'une pièce usinée, les aciers sont actuellement réservés à des emplois bien précis :

- outils dont la souplesse est indispensable (ruban) ;
- outils pour l'usinage de bois tendres et non abrasifs (bien que d'autres matériaux soient de plus en plus utilisés) ;
- outils spécifiques pour des séries limitées ;
- outils à angles de taillant très petits (massicot, couteaux de dérouleuse) ;
- outils très minces pour des usinages spéciaux ;
- outils pour usinages aux conditions très difficiles (travaux avec chocs par exemple).

Ils se présentent soit sous la forme d'outils monomatériaux, soit avec des parties tranchantes en acier rapide (souvent appelé HSS - *High Speed Steel*) brasées sur un corps en acier moins noble (§ 1.5).

1.4.2 Alliages chrome-cobalt

Parmi ces alliages, le plus connu est sans doute le **Stellite** dont une des caractéristiques est de conserver à chaud ses qualités mécaniques. La figure 5 met en évidence que la dureté du Stellite (47 à 52 HRC) est à froid nettement inférieure à celle de l'acier, mais qu'elle se conserve particulièrement bien lorsque la température s'élève, alors que celle de l'acier chute considérablement. Sachant également que les matériaux de base de cet alliage sont résistants à la corrosion, on comprend aisément que sa résistance à l'usure soit remarquable.

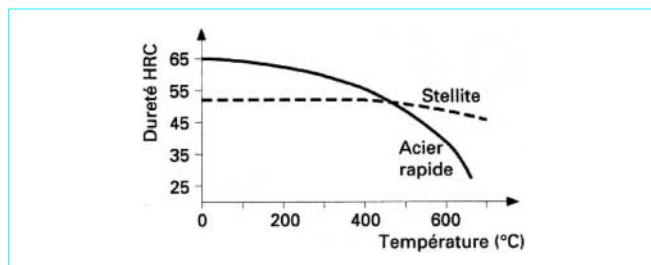


Figure 5 – Évolution de la dureté en fonction de la température pour le Stellite vis-à-vis de l'acier rapide

Parmi les différentes nuances (appelées *grades*) de Stellites, seules deux sont couramment utilisées pour les outils à bois : les grades 1 et 12 ; leurs compositions figurent dans le tableau 3.

Composition	Stellite		Tantung
	grade 1	grade 12	
Chrome	33	29	27 à 32
Cobalt	50	58	45 à 50
Carbone	2,4	1,9	2 à 4
Tungstène	13	9	14 à 19
Silicium	0,8	0,8	–
Tantale	–	–	2 à 7
Manganèse	–	–	1 à 3
Fer	–	–	2 à 5
Divers	0,8	1,3	–

Le Stellite est très utilisé en scierie, car il sert à la préparation des lames à ruban. Il est déposé par fusion sur la pointe des dents de scies.

Pour les autres outils à bois, on utilise le **Tantung**, un alliage voisin. Cet alliage se présente sous forme de barreaux, qui sont tronçonnés et profilés par le fabricant d'outils avant d'être brasés sur un corps en acier. Il existe deux sortes de Tantung, mais une seule est utilisée dans l'industrie du bois. Sa composition est donnée dans le tableau 3. Sa dureté est, à froid, voisine de celle de l'acier, de l'ordre de 60 à 65 HRC, mais elle se conserve remarquablement jusqu'à des températures supérieures à 700 °C.

Les qualités des alliages chrome-cobalt sont les suivantes :

- une bonne résistance à l'usure ;
- une bonne arête de coupe ;
- une mise en œuvre très facile soit par fusion, soit par brasage ;
- une facilité d'affûtage par la meule vitrifiée ou la meule *borazon*.

Leurs domaines d'application privilégiés sont :

- en scierie, où la tenue de coupe des rubans en acier est souvent une limite à la rentabilité des investissements, alors que ceux à pastilles rapportées en carbure de tungstène sont d'emploi et d'entretien quasi impossibles ;
- en menuiserie, spécialement pour l'usinage de bois de faible ou moyenne dureté, mais abrasifs. Toutefois, les évolutions récentes des outils en carbure de tungstène limitent ces cas d'application.

1.4.3 Carbures de tungstène

Les carbures de tungstène sont obtenus par frittage (à environ 1 400 °C et 150 à 220 MPa), c'est-à-dire par agglomération de grains de carbure de tungstène WC à l'aide d'un liant, le cobalt, contrairement aux aciers et alliages chrome-cobalt qui sont des matériaux homogènes, obtenus par combinaison à très petite échelle (fusion) des différents composants dans un mélange intime.

Ces deux éléments principaux (Co et WC) sont choisis pour leurs caractéristiques complémentaires.

Le *carbure de tungstène* a pour principales qualités :

- sa dureté (85 à 90 HRC), qui le place parmi les corps connus les plus durs, après le diamant et le nitrure de bore cubique (*borazon*), ce qui lui confère une excellente résistance à l'abrasion ;
- sa température de fusion particulièrement élevée, qui lui permet de supporter sans dommage les températures atteintes lors de l'usinage ;
- sa bonne inertie aux attaques physico-chimiques.

Le *cobalt* est choisi pour son aptitude à lier les grains entre eux. Bien sûr, cette hétérogénéité se traduit par une certaine sensibilité aux chocs et vibrations, car les surfaces d'assemblage sont autant de zones de fragilité potentielle. C'est pourquoi il est recommandé que l'angle de taillant β soit au moins égal à 60° .

On ajoute à la poudre initiale (WC + Co) d'autres éléments : carbures de tantale, nitrures de titane, etc. pour améliorer les caractéristiques telles que la résistance à l'abrasion, la résistance aux chocs, etc.

■ Le **frittage**, assemblage des grains entre eux, peut se faire de deux façons :

— le **frittage direct**, en une seule opération : les grains de carbure de tungstène, enrobés de cobalt et de paraffine, sont placés dans le moule correspondant à la forme à obtenir. On applique une pression de 150 à 220 MPa, sous une température de $1\,400^\circ\text{C}$. La paraffine s'évapore, le cobalt se diffuse et la plaquette ainsi obtenue est prête à être affûtée et utilisée. C'est le mode retenu pour toutes les formes d'outil fabriquées en grandes séries ;

— le **frittage effectué en deux temps** : les grains enrobés sont ici encore placés dans le moule et soumis à la même pression, mais porté à une température de $700\text{--}800^\circ\text{C}$: c'est le préfrittage. Le produit obtenu a une consistance voisine de celle de la craie ; il est donc facilement usinable (par sciage, meulage), et l'on profile ainsi les outils de formes spéciales ou fabriqués en petites séries. Le frittage définitif suit cette opération en chauffant la plaquette à $1\,400^\circ\text{C}$.

■ Les **performances du produit** obtenu sont fonction de deux paramètres principaux :

— le pourcentage relatif Co-WC : la résistance aux chocs s'accroît en même temps que le taux de Co s'élève (figure 6), mais la résistance à l'usure diminue ;

— la granulométrie, la dimension des grains variant environ de $0,5$ à $10\,\mu\text{m}$: des grains de *petit* « diamètre » engendrent un matériau résistant à l'usure (figure 6), mais fragile.

Tout l'art du carburier consiste à trouver le meilleur compromis en fonction d'une utilisation bien définie : il n'existe pas UN mais DES carbures de tungstène.

L'usure de ce matériau fritté se fait par séquences : dès que les arêtes d'un grain commencent à s'émousser, les efforts de coupe qui lui sont appliqués augmentent et il se détache. Cela se produit non seulement lors du travail, mais également à l'affûtage. Le rayon de courbure de l'arête de coupe est donc en fait le rayon moyen des grains de WC. Cette particularité entraîne :

— un pouvoir tranchant inférieur à celui des aciers, se traduisant par une mauvaise aptitude à l'usinage de bois tendres, mais cet écart ne cesse de diminuer grâce à la commercialisation de nuances aux structures de plus en plus fines ;

— une absence de bavure lors de l'affûtage. Il est inutile (et même déconseillé) de pierrer (ébavurer) un outil en carbure après affûtage.

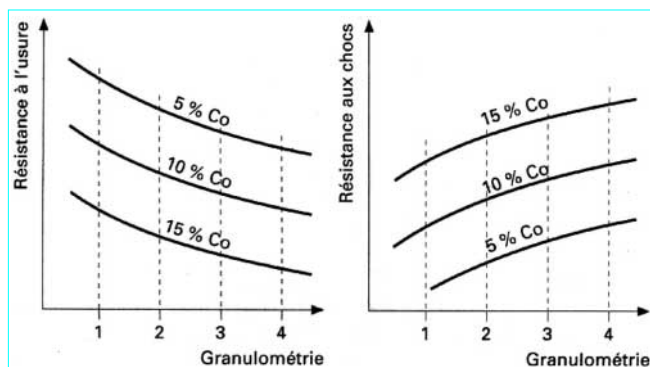
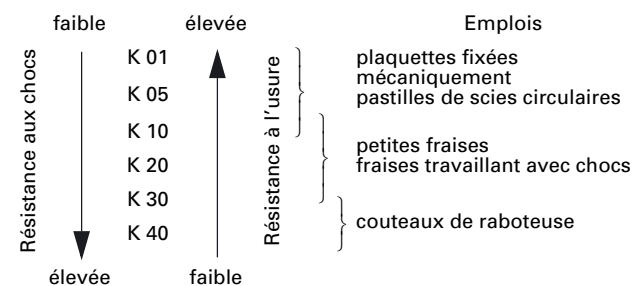


Figure 6 – Évolution de la résistance aux chocs et de la résistance à l'usure des carbures de tungstène selon la composition et la granulométrie

De nombreuses plaquettes de carbure sont revêtues d'oxydes, nitrures ou carbures qui leur confèrent une meilleure tenue de coupe. Ces **revêtements** (de quelques micromètres d'épaisseur) sont le carbure de titane TiC, le nitrure de titane TiN et l'alumine Al_2O_3 . Cette opération présente l'inconvénient majeur d'arrondir l'arête de coupe, ce qui rend ces plaquettes **impropres au travail du bois**.

D'une façon générale, le carbure se présente sous forme de plaquettes qui sont brasées ou fixées mécaniquement sur un corps en acier. Le carbure supporte très bien l'opération de brasage, mais des précautions particulières doivent être prises pour les outils de grandes dimensions : le coefficient de dilatation du carbure étant différent de celui de l'acier, des ruptures sont à craindre, surtout avec les compositions les plus pauvres en cobalt. C'est pourquoi les nuances les plus résistantes à l'usure sont réservées aux plaquettes fixées mécaniquement.



La lettre K n'a pas de signification particulière ; elle correspond au groupe de carbures convenant au travail du bois. Le numéro associé est une simple échelle de valeur permettant le classement vis-à-vis de la résistance à l'usure et aux chocs.

Certains outils de petite taille (mèches par exemple) sont entièrement en carbure de tungstène.

■ L'**affûtage d'un outil** nécessite un abrasif d'une plus grande dureté. Pour le carbure de tungstène, il est nécessaire d'employer des meules diamant. Cette opération nécessite toujours une affûteuse en bon état, capable d'absorber les efforts engendrés par le meulage d'un matériau dur. L'affûtage peut s'effectuer avec ou sans arrosage, mais il est préférable d'arroser abondamment car l'enlèvement de matière est facilité, l'échauffement est réduit, l'affûtage est plus rapide, le résultat est de meilleure qualité et les meules ont une longévité accrue.

■ Les **applications préférentielles** du carbure de tungstène sont les usinages de matières abrasives (nombreux bois exotiques, panneaux, matériaux composites). Mais leur tenue de coupe élevée (jusqu'à 30 fois celle de l'acier) les fait apprécier également pour l'usinage d'autres matières moins désaffûtantes (usantes). Les carbures « micrograins ou submicrograins » apparus récemment sont intéressants à plusieurs titres :

— le pouvoir tranchant est nettement amélioré, ce qui les rend aptes au travail des essences tendres ;

— la tenue de coupe est singulièrement augmentée, allant jusqu'à 3 ou 4 fois celle des compositions classiques.

L'avènement des porte-outils à plaquettes jetables, en réduisant considérablement l'entretien, augmente sans cesse le nombre des applications.

1.4.4 Diamant polycristallin

Le diamant est le corps le plus dur que l'on connaisse. Cette qualité est mise à profit depuis longtemps pour l'usinage des métaux non ferreux. Mais les seuls diamants disponibles étaient, jusqu'à il y a une vingtaine d'années, les diamants naturels, ce qui limitait les emplois. Depuis que l'on sait fabriquer industriellement des grains de diamant, les utilisations se sont multipliées, et nous avons vu apparaître ce matériau pour l'usinage des panneaux il y a une quinzaine d'années.

Le qualificatif *polycristallin* est donné à ce matériau pour le distinguer du diamant naturel *monocristallin* où chaque grain, si gros soit-il, n'est constitué que par un seul cristal. Les plaquettes que l'on utilise actuellement sont constituées d'une multitude de grains de diamant. Ces grains sont obtenus à partir d'une poudre de carbone pur passée dans un four à hautes pressions et températures, et sont déposés à la surface d'une plaquette en carbure de tungstène revêtue d'une fine couche de métal. Cette opération nécessite un grand savoir-faire et un équipement particulièrement onéreux. Seules quelques sociétés fabriquent industriellement de telles plaquettes vendues en l'état aux fabricants d'outils, qui les mettent en forme, les brasent et les affûtent.

Les formes de ces plaquettes sont standardisées, disques ou secteurs de disques, et rectangles. Les arêtes de coupe sont souvent plus grandes que ces plaquettes : les outils sont alors conçus avec des arêtes sectionnées (figure 7). Ces plaquettes sont facilement électroéroderables. Cette particularité est mise à profit pour :

- la découpe et l'affûtage de plaquettes de forme, par électroérosion à fil ;
- l'affûtage d'arêtes de coupe rectilignes, par électroérosion à fil ou par enfonçage.

Ces deux techniques ont remplacé l'affûtage par meule diamant, long et onéreux, qui ne subsiste que pour de rares cas particuliers. Il est évident que l'entretien de tels outils est réservé aux fabricants d'outils qui, seuls, ont l'équipement et le savoir-faire indispensables.

L'**avantage principal** de ce matériau est sa longévité de coupe très élevée (de 100 à 200 fois celle des carbures classiques), qui permet l'amortissement d'outils pourtant chers à l'achat. Son **inconvénient principal** est sa fragilité, car la cohésion de la couche de diamant est quasi nulle. Elle est déposée sur un substrat en carbure lui-même fragile : l'ensemble ne peut qu'être très sensible aux chocs (heurts, vibrations, chocs thermiques). Pour éviter des fissures ou des brèches à l'arête de coupe, il est recommandé d'éviter des angles de taillant β inférieurs à 75° .

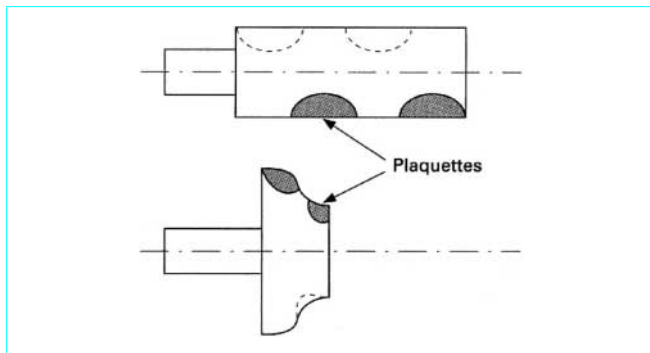


Figure 7 – Plaquettes de diamant polycristallin sur l'arête de coupe

L'**application privilégiée** de ces outils est l'usinage de matériaux abrasifs, à condition :

- d'utiliser une machine en excellent état mécanique (ni à-coups, ni vibrations) ;
- d'être soigneux et attentif lors des interventions sur l'outil (démontage, manipulations) ;
- d'usiner des matériaux exempts d'inclusions métalliques ou minérales risquant d'engendrer des ruptures. Des détecteurs installés sur les machines en amont des outils permettent d'éviter tous les accidents dus à des corps métalliques.

En diminuant le nombre d'interventions sur la machine pour changement d'outil, le diamant polycristallin améliore la rentabilité d'opérations d'usinage à coût horaire élevé. C'est pourquoi ces outils sont de plus en plus utilisés sur des chaînes ou des centres d'usinage à commande numérique.

1.4.5 Céramiques

Sous ce nom générique, on regroupe des matériaux aux caractéristiques physiques et mécaniques très différentes, aux applications très diverses. Pour la coupe, où l'on recherche la dureté, la résistance aux chocs, aux efforts et à l'usure, seules quelques compositions présentent des performances intéressantes pour le travail du bois et de ses dérivés. Actuellement, il n'existe pas encore d'exemples d'utilisation industrielle, mais de nombreuses tentatives de développement de ces matériaux pleins de promesses sont en cours. On peut supposer que les céramiques seront utilisées dans les prochaines années, pour l'usinage du bois et des panneaux.

Les céramiques sont des matériaux frittés, composés à partir d'oxydes, carbures ou nitrures. Souvent, le composant de base représente 95 à 99,7 % de la composition. Dans la panoplie disponible, qui s'étoffe en permanence, trois familles peuvent retenir notre attention :

- les **alumine**s, dont le composant de base est l'oxyde d'aluminium Al_2O_3 et qui présentent de nombreuses qualités, malheureusement limitées par une résistance mécanique médiocre ;
- les **zircones**, élaborées à partir de l'oxyde de zirconium ZrO_2 , utilisées dans de nombreux domaines mais qui ne sont pas brasables ;
- les **nitrures de silicium** Si_3N_4 , qui sont apparus très récemment et dont tous les domaines d'emploi n'ont pas encore été explorés. Leurs caractéristiques physiques et mécaniques laissent espérer des applications dans le secteur de la coupe du bois et des panneaux. Ils présentent, en outre, la propriété d'être électroéroderables (appréciable pour la réalisation d'outils de forme) et facilement brasables.

On peut attendre des céramiques qu'elles viennent occuper un créneau situé entre le carbure de tungstène et le diamant synthétique. Ces deux matériaux de coupe sont en effet assez éloignés, tant sur le plan des performances que sur celui du prix.

1.4.6 Choix du matériau de coupe

Selon les produits fabriqués, le coût de l'usinage peut se révéler important. Il est donc essentiel de ne pas commettre d'erreur lors de l'achat d'un nouvel outillage. Le matériau de coupe doit être défini après une réflexion d'autant plus poussée que la machine sur laquelle il doit se monter est d'un taux horaire élevé.

La figure 8 résume les performances comparées et le tableau 4 les principales applications des matériaux de coupe actuellement utilisés.

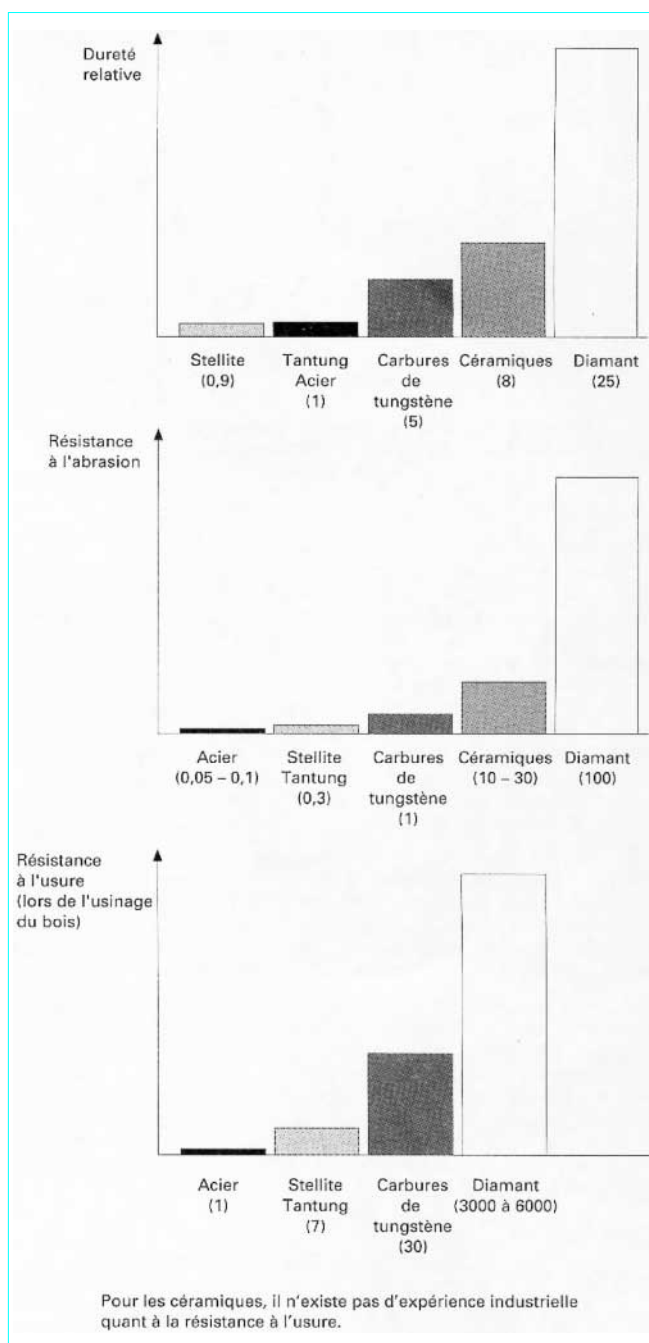


Figure 8 – Performances comparées des différents matériaux de coupe

1.5 Conceptions d'outils

Les qualités exigées des parties tranchantes et du corps de l'outil sont différentes, et parfois même contradictoires. Pendant longtemps, on a recherché le meilleur compromis, avec ce que cela comporte de difficultés. Actuellement, les ressources de la technique et la panoplie de matériaux de coupe disponibles permettent les combinaisons les plus variées (figure 9).

Tableau 4 – Choix du matériau de coupe					
*** très bon ** bon * assez bon sans étoile : déconseillé	Bois massifs				Panneaux
	tendres		durs		
	abrasifs	non abrasifs	abrasifs	non abrasifs	
Acier		***		*	
Carbure de tungstène	**	*	***	***	***
Diamant polycristallin			**		***
Stellite (ruban de scierie)	***	*	***	**	

Ces combinaisons concernent aussi bien les outils à queue que les outils à alésage :

— l'*outil à queue* est un outil dont une extrémité est un cône ou un cylindre qui permet la fixation dans un mandrin installé sur la machine-outil. Ce mode de fixation est fréquent pour des outils de petit diamètre (mèches, fraises de défonçage, etc.), mais il se généralise sur tous les centres d'usinage équipés d'un magasin et d'un chargeur d'outil automatique ;

— l'*outil à alésage* est un cylindre percé en son centre d'un alésage. Cet outil (fraise, porte-outil de rabotage, scie circulaire, etc.) est installé directement sur l'arbre de la machine.

1.5.1 Outils monomatériaux

Jusqu'à un passé récent, seuls ces outils ont été utilisés pour le travail du bois. Bien que moins recherchés, ils conservent encore des applications privilégiées :

- les scies à ruban de menuiserie en acier : il est, en effet, difficile de rapporter durablement des dents sur un feuillard (ruban) de 0,5 à 1 mm d'épaisseur ;
- certaines scies circulaires en acier lorsque les travaux exécutés imposent des outils ultraminces ou avec des dentures très fines ;
- des mèches à percer ou à défoncer en acier ou en carbure de tungstène monobloc ;
- des fraises de toupie en acier lorsque les bois sont peu abrasifs, très tendres, ou que les séries sont trop petites pour justifier un outillage plus élaboré ;
- de nombreux bédanes, des outils de tour, etc., en acier.

1.5.2 Outils multimatériaux

De loin les plus utilisés, ils combinent les avantages de l'acier ou d'alliages légers pour le corps et des matériaux durs pour les dents : acier rapide (parfois), Stellite (en scierie), Tantung, carbure et tungstène (le plus souvent) et, depuis quelques années diamant synthétique, pour ne citer que ceux utilisés actuellement.

Ces matériaux de coupe sont fixés sur le corps de différentes façons :

- par **fusion directe** sur le support en acier : c'est le mode de chargement des dents des scies à ruban avec du Stellite. Après quelques affûtages, le Stellite finit par disparaître. L'affûteur (l'atelier d'affûtage intégré à la scierie est en général équipé du matériel adéquat) doit effectuer, selon une procédure définie, le rechargement des dents, suivi d'un affûtage complet ;

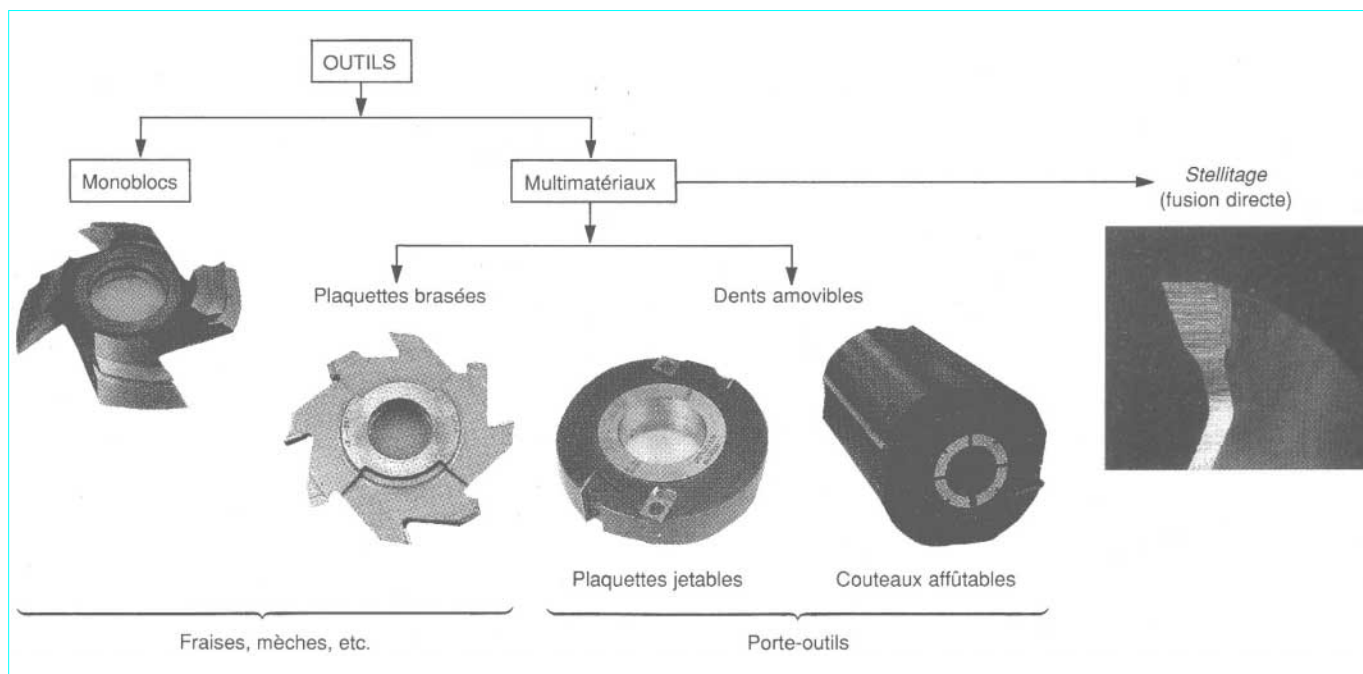


Figure 9 – Différentes familles d'outils pour le travail du bois

■ par **brasage** : la majeure partie des matériaux sont brasables sur des corps en acier. Cette opération doit être parfaitement maîtrisée pour ne pas altérer les qualités du matériau brasé, ni mettre en danger les utilisateurs. C'est pourquoi elle est réservée aux ateliers bien équipés, en général les entreprises spécialisées dans l'affûtage ou la fabrication d'outils. Chaque affûtage diminue la dimension des dents, jusqu'à la quasi-disparition de la plaquette brasée, ce qui impose le changement d'outil. Bien souvent, le corps a été usé, atteint lors des affûtages et il n'est pas récupérable. Parfois, il est techniquement possible et économiquement intéressant de la faire *repastiller* (rebraser de nouvelles dents en remplacement d'anciennes) ;

■ par **fixation mécanique** : un tel ensemble est appelé *porte-outil*.

● Les **couteaux amovibles** peuvent être affûtés, en acier ou en carbure de tungstène. Ils sont souvent droits, mais il existe des affûteuses qui permettent à l'utilisateur lui-même de profiler et d'affûter des couteaux de formes complexes à partir d'un simple gabarit en tôle. Ces outils sont bien sûr intéressants pour :

- les petites séries ;
- les sous-traitants travaillant selon les profils imposés par leurs clients ;
- des travaux aux délais très courts ne laissant pas la possibilité de faire réaliser un outillage spécial ;
- des travaux demandant des outils à profil constant.

● Il existe aussi des **couteaux jetables** après emploi. Ces plaquettes présentent généralement deux à quatre arêtes de coupe (à l'exception des plaquettes de forme qui n'en possèdent qu'une). Ainsi, on pourra les retourner pour user la totalité des arêtes de coupe. Bien que le prix d'achat de tels outils soit légèrement plus élevé, cette solution présente de nombreux avantages, parmi lesquels :

- la suppression de l'affûtage parfois long et onéreux ;
- la très bonne conservation du diamètre et du profil puisqu'il n'y a plus d'usure liée à l'affûtage ;
- l'amélioration de la sécurité par la réduction du dépassement des plaquettes par rapport au porte-outil ;
- la réduction du bruit par la diminution des turbulences ;
- la meilleure conservation de l'équilibre.

Elle est retenue chaque fois que le produit fabriqué laisse entrevoir une durée suffisante pour amortir cette acquisition.

1.5.3 Choix de la conception de l'outil

Au moment de l'achat, l'utilisateur veille à choisir l'outil dont la conception correspond le mieux à son besoin, car toute erreur en ce domaine est absolument irrémédiable. L'affûtage ayant pour conséquence d'enlever de la matière, donc de diminuer le diamètre de l'outil, les fabricants ont fait preuve d'imagination pour compenser (plus ou moins automatiquement) cette réduction. L'avantage principal des porte-outils à plaquettes jetables est de conserver indéfiniment les dimensions initiales, puisque les dents usées sont remplacées par des dents rigoureusement identiques.

Usiner des pièces toujours avec le même profil est souvent indispensable. En effet, même si l'affûtage s'effectue en général sur la face d'attaque ou de dépouille, le profil est modifié à cause de l'incidence des angles de dépouille (radial et latéral). Cela peut être gênant car le profil des pièces risque d'être changé (usinage de moulures, profils, etc.). Mais les conséquences peuvent être considérables dans le cas d'assemblages dont la résistance est sensiblement diminuée par des profils non jointifs. Pour éviter cet inconvénient, les solutions sont les suivantes :

- utiliser des fraises extensibles (en deux parties) pour la réalisation de rainures ou de languettes. Les usinages sont ainsi de dimensions constantes ;
- affûter par copiage d'un gabarit, ce qui permet la réelle conservation de profils complexes ;
- utiliser des porte-outils à plaquettes jetables : le remplacement des plaquettes n'entraîne aucune modification du profil.

Tous les outils tournants doivent être **équilibrés dynamiquement** pour éviter les vibrations qui entraînent :

- un état de surface de la pièce usinée imparfait ;
- une durée de vie des organes de la machine (roulements de broche en particulier) réduite ;
- une durée de coupe des outils diminuée ;
- un bruit plus intense ;
- une moindre sécurité pour l'utilisateur.

Cet équilibrage doit être effectué par la fabrication d'outils, conformément à la réglementation en vigueur (NF E 73-504). Tout enlèvement de matière important (à l'occasion d'un affûtage par exemple) doit être suivi d'un rééquilibrage. Dans les cas particuliers d'outils tournant à grande vitesse, d'outils empilés sur un même arbre ou creux, volumineux, montés en porte-à-faux, il est indispensable de demander à son fournisseur que l'équilibrage soit plus précis que celui requis par les normes.

N'oublions pas qu'un jeu important entre l'arbre de la machine et l'alésage de l'outil annule tous les effets d'un bon équilibrage. Ce jeu arbre-alésage doit être le plus près possible de zéro. Ainsi, l'outil a la précision nécessaire pour que toutes les arêtes de coupe soient bien situées sur le même cercle de coupe. Il est, en effet, difficile d'obtenir une concentricité meilleure que ce jeu, malgré les efforts de l'affûteur et du régleur. Les normes de fabrication d'outils prévoient des ajustements glissants justes (H7g6). Pourtant, dans les cas où les exigences d'états de surface sont grandes, cela ne suffit pas. Il faut avoir recours aux outils à centrage hydraulique qui annulent totalement ce jeu (figure 10).

Mais ces outils et porte-outils n'apportent un avantage déterminant que dans la mesure où ils sont montés sur des machines en excellent état mécanique, car ils ne suppriment ni le jeu des roulements ni les faux-ronds des arbres.

Ces outils sont d'autant plus intéressants qu'il n'apportent aucune contrainte à l'utilisateur. La seule précaution consiste à ne jamais mettre un tel outil sous pression sans qu'il soit monté sur un arbre : la déformation de l'alésage serait permanente et rendrait l'outil inutilisable.

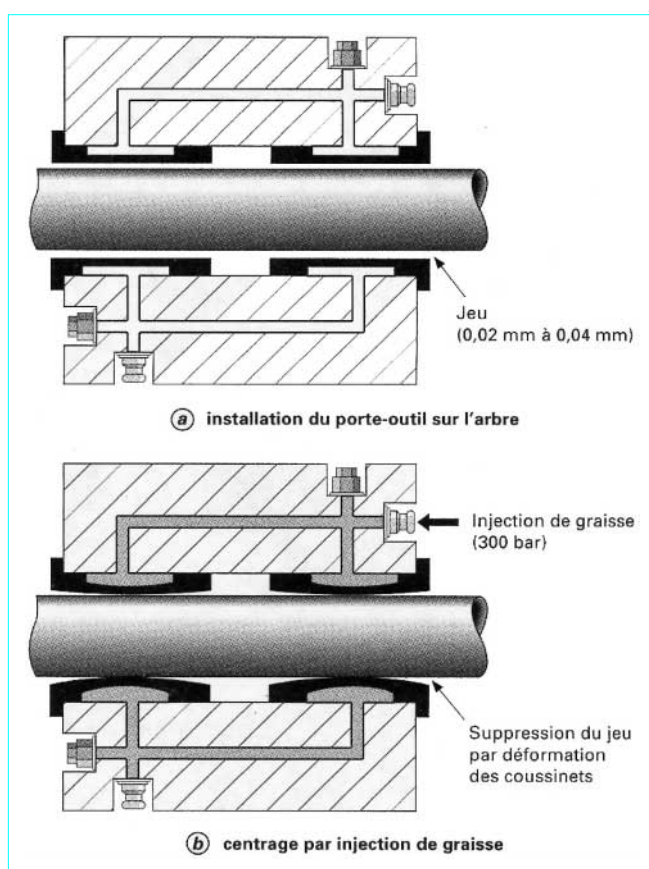


Figure 10 – Outils à centrage hydraulique

2. Copeau

2.1 Directions de coupe

Pour appréhender le phénomène de la coupe, il est indispensable de connaître l'organisation de la matière bois.

Le bois est un matériau anisotrope. La matière ligneuse (fibres, vaisseaux et rayons) est orientée selon trois directions principales (figure 11) :

- la *direction axiale ou longitudinale*, définie par l'orientation des fibres ; c'est également la direction générale de la grume ;
- la *direction radiale*, perpendiculaire à la précédente et parallèle aux rayons ;
- la *direction tangentielle*, perpendiculaire aux deux précédentes et définie tangentiellement aux cernes d'accroissement.

La conséquence directe de cette anisotropie est la différence de comportement du bois selon le sens de sollicitation, aussi bien vis-à-vis des contraintes mécaniques que sous l'action de l'outil. Cela explique pourquoi les outils ont une géométrie distincte suivant qu'ils opèrent dans l'une ou l'autre de ces directions.

Pour faciliter la **description des modes de coupe**, on utilise une **représentation à base de deux nombres** :

- le *premier* représente l'angle formé entre la direction de l'arête de coupe et le fil du bois ;
- le *second* représente l'angle formé entre la direction de déplacement de l'outil et le fil du bois.

Tous les modes d'usinages peuvent être représentés ainsi, les principaux sont indiqués sur la figure 11.

2.2 Efforts de coupe

En pénétrant dans la matière pour détacher un copeau, la dent doit exercer un effort supérieur à la cohésion du matériau. Cet effort est la résultante de plusieurs forces : celle nécessaire pour faire fléchir les fibres, la force de coupe par cisaillement et les frottements qui s'exercent sur les faces de l'outil.

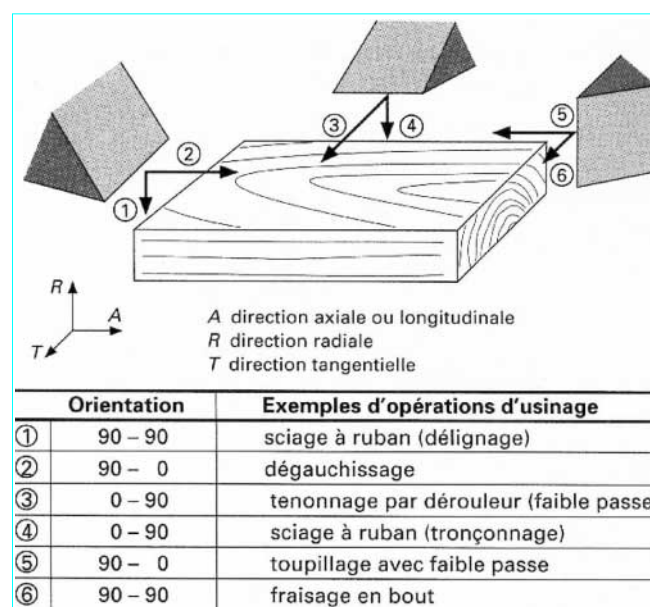


Figure 11 – Description des modes de coupe (se reporter à l'article Travail mécanique du bois. Principales opérations d'usinage [B 7 306])

Cet effort, appelé effort de coupe, est fonction du matériau usiné, des conditions de travail et de l'outil :

- les paramètres liés au matériau usiné sont sa masse volumique, la nature de l'essence (abrasivité) et son humidité ;
- les facteurs liés aux conditions de travail sont le sens de travail par rapport aux fibres, la profondeur de passe, la largeur et l'épaisseur du copeau et les vitesses de coupe et d'avance ;
- les paramètres propres à l'outil sont le diamètre, l'angle de coupe γ , l'angle de dépouille α , la finesse de l'arête de coupe, le dépassement de l'outil par rapport à un éventuel contre-fer et le nombre d'arêtes tranchantes.

■ **Décomposition de l'effort de coupe** : plus on se rapproche de l'arête de coupe, plus les forces qu'exerce l'outil sur le bois sont élevées. La résultante de ces efforts est une force qui prend appui en un point situé au voisinage de l'arête. Compte tenu des frottements, sa direction fait avec la normale à la face de coupe un angle d'autant plus grand que le coefficient de frottement bois-métal est élevé. (figure 12a).

Il est possible de décomposer cet effort F_c selon deux composantes : l'une orthogonale à la trajectoire de l'outil, l'effort normal F_{fN} et l'autre axiale F_f (figure 12b), selon les symbolisations de la norme NF E 66-507.

L'importance de F_{fN} influe sur le couple que doit développer le moteur actionnant l'outil. F_f caractérise la résistance à l'avancement, donc l'effort que doit vaincre l'opérateur ou le moteur d'avance dans le cas de machine à aménagement automatique. Selon la valeur de l'angle de coupe, cet effort peut être positif ou négatif, ce qui se traduit par un effort pour faire avancer la pièce ou au contraire pour la retenir.

Dans la réalité, l'arête de coupe est toujours plus ou moins arrondie (selon le degré d'usure, la qualité d'affûtage et la nature du matériau), ce qui empêche de définir exactement la direction de l'effort de coupe. Les conséquences sont toujours :

- un accroissement de l'effort de coupe car l'arête est moins tranchante ;
- une diminution de l'effort normal (F_{fN} devient même négatif) ;
- une augmentation de l'effort axial F_f .

Les efforts de coupe sont directement influencés par les facteurs inhérents au matériau, à l'outil et aux conditions de travail. Les graphiques de la figure 13 illustrent l'évolution des efforts en fonction de quelques paramètres importants.

2.3 Géométrie du copeau

La plupart des opérations d'usinage se traduisent par la formation de copeaux. L'analyse de leur forme et de leurs dimensions est riche d'enseignement, surtout dans le cas où des défauts apparaissent et que l'on en recherche la cause. Les conséquences directes de l'épaisseur moyenne du copeau sont la qualité de la surface engendrée, la puissance absorbée et la tenue de coupe. L'objet n'est pas d'étudier dans cet article toutes les formes de copeaux, mais d'aborder celles correspondant aux modes d'usinage les plus courants.

Le copeau est toujours défini par le volume de bois compris entre les trajectoires de deux dents successives.

■ Sciage

Le copeau obtenu par le *sciage au ruban* a la forme la plus simple qui soit, car la trajectoire de la dent est rectiligne, ainsi que l'avance du bois. Sa section est rectangulaire avec une épaisseur constante, égale à l'avance par dent. La largeur du copeau correspond à l'épaisseur de la dent. Sa longueur est fonction de la hauteur sciée, ainsi que des vitesses de coupe et d'avance (tableau 5). La vitesse d'avance a pour effet d'augmenter l'angle de coupe γ et de diminuer l'angle de dépouille α , puisque la trajectoire s'incline. Ce sont les *angles dits de l'outil au travail*.

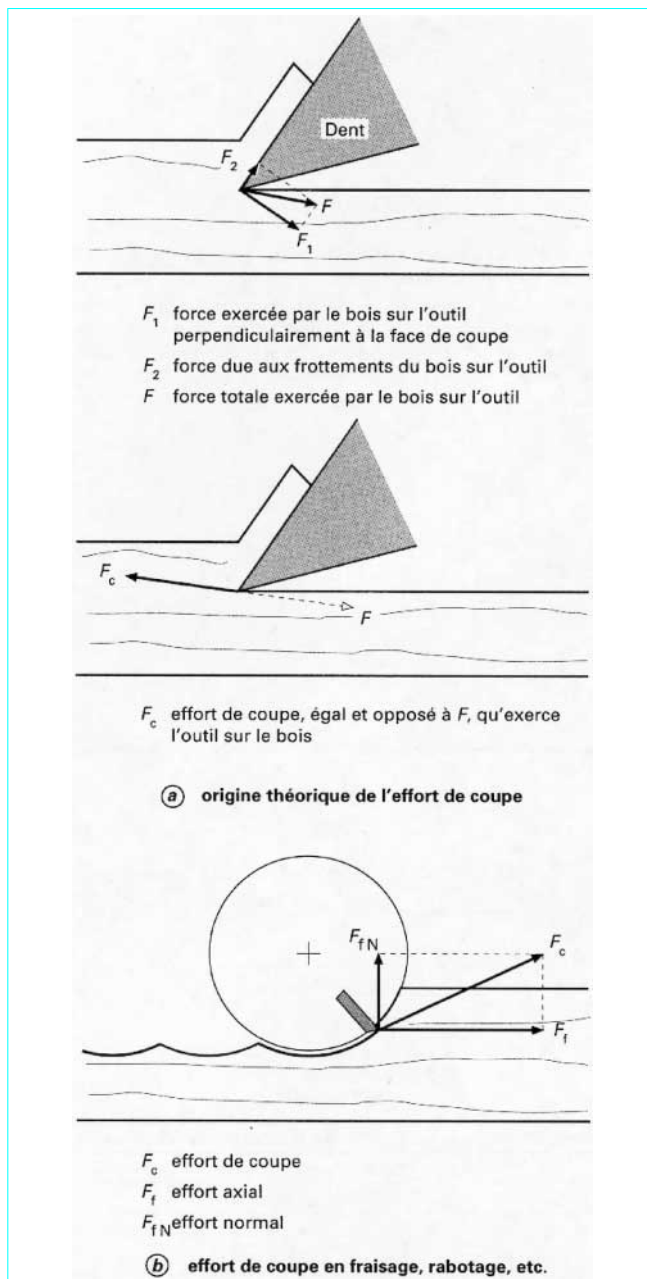


Figure 12 – Décomposition de l'effort de coupe

À la *scie circulaire*, le copeau a la forme d'une faucille épointée. Sa largeur est constante (c'est l'épaisseur de la dent), mais son épaisseur varie en continu d'une extrémité à l'autre. Ses caractéristiques sont données par les formules approchées du tableau 5.

■ Rabotage, dégauchissage, toupillage, etc.

Tous les usinages dont la trajectoire de la dent par rapport au bois est une trochoïde façonnent des copeaux de forme identique, ressemblant à une faucille. La largeur est égale à la largeur de la pièce ou à celle de l'outil. Lors du travail en opposition, l'épaisseur est nulle au début et croît jusqu'à une valeur maximale en sortie, alors que c'est l'inverse lors du travail en avalant. Les caractéristiques des copeaux sont définies dans le tableau 5.

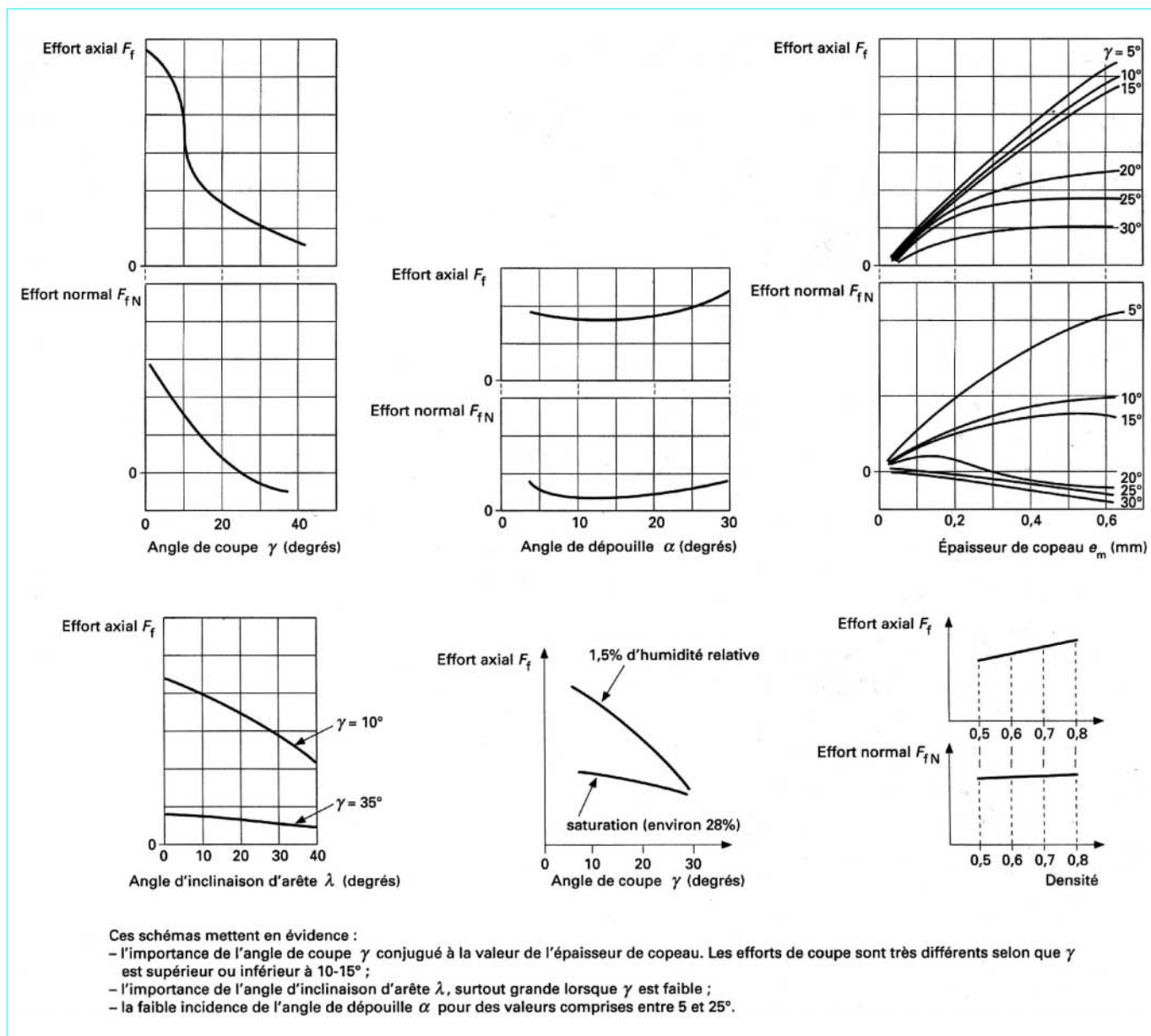


Figure 13 – Évolution des efforts axial et normal en fonction de différents paramètres [1]

Dans de nombreux cas, l'approximation qui consiste à assimiler les trajectoires des dents à des arcs de cercle est suffisante : elle revient à négliger la vitesse d'avance par rapport à la vitesse de coupe. Pour des approches plus précises, cela n'est plus acceptable. Il faut donc prendre en compte l'influence de la vitesse d'avance, qui modifie la trajectoire. Là encore, lors du travail, l'angle de coupe γ est augmenté alors que celui de dépouille α est réduit, selon les formules suivantes :

$$\gamma_{\text{instantané}} = \gamma + \arccos\left(\frac{R-h}{R}\right) - \arctan\left[\frac{2\pi\sqrt{2Rh-h^2}}{2\pi(R-h) + f_z Z}\right]$$

$$\alpha_{\text{instantané}} = \alpha - \arccos\left(\frac{R-h}{R}\right) + \arctan\left[\frac{2\pi\sqrt{2Rh-h^2}}{2\pi(R-h) + f_z Z}\right]$$

$\gamma_{\text{instantané}}$ et $\alpha_{\text{instantané}}$ étant les angles de coupe et de dépouille au point h de la trajectoire (h variant de 0 à H) et dans lesquelles h et H sont définis au tableau 5.

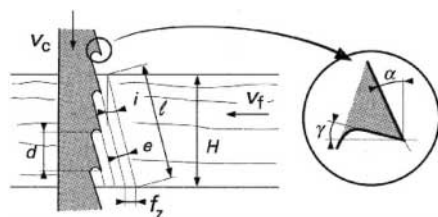
■ Perçage

La forme générale du copeau est celle d'une hélice. Sa largeur est égale à la longueur de l'arête de coupe de l'outil. Son épaisseur correspond à l'avance par dent (tableau 5).

Tableau 5 – Dimensions du copeau pour les modes d'usinage les plus courants

SCIAGE

Scie au ruban



$$f_z = \frac{d v_f}{60 v_c}$$

$$e = f_z \cos i = f_z \cos \left[\arctan \left(\frac{v_f}{60 v_c} \right) \right]$$

$$\ell = \frac{H}{\cos i} = \frac{H}{\cos \left(\arctan \frac{v_f}{60 v_c} \right)}$$

$$\alpha_{\text{réel}} = \alpha - i$$

avec

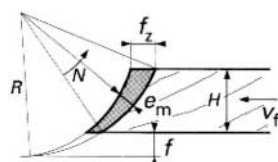
$$i = \arctan \frac{v_f}{60 v_c}$$

donc

$$\alpha_{\text{réel}} = \alpha - \arctan \frac{v_f}{60 v_c}$$

$$\gamma_{\text{réel}} = \gamma + \arctan \frac{v_f}{60 v_c}$$

Scie circulaire



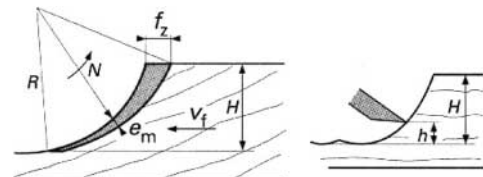
$$f_z = \frac{1\,000 v_f}{NZ}$$

$$e_m = \frac{1\,000 v_f}{NZD} \left[\sqrt{(D-H-f)f} + \sqrt{(D-f)(H+f)} \right]$$

$$\ell = R \left[\arccos \left(\frac{R-H-f}{R} \right) - \arccos \left(\frac{R-f}{R} \right) \right]$$

RABOTAGE, DÉGAUCHISSAGE, TOUPILLAGE, etc.

Usinage en opposition

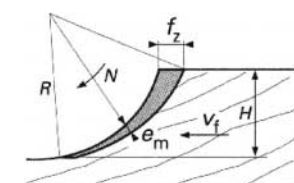


$$f_z = \frac{1\,000 v_f}{NZ}$$

$$e_m = \frac{[f_z H]}{R \arccos \left(1 - \frac{H}{R} \right) + \frac{f_z Z \sqrt{DH-H^2}}{\pi D}} \approx f_z \sqrt{\frac{H}{D}}$$

$$\ell = R \arccos \left(1 - \frac{H}{R} \right) + \frac{f_z Z \sqrt{DH-H^2}}{\pi D}$$

Usinage en avalant

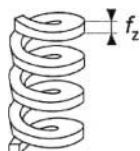


$$f_z = \frac{1\,000 v_f}{NZ}$$

$$e_m = \frac{[f_z H]}{R \arccos \left(1 - \frac{H}{R} \right) - \frac{f_z Z \sqrt{DH-H^2}}{\pi D}} \approx f_z \sqrt{\frac{H}{D}}$$

$$\ell = R \arccos \left(1 - \frac{H}{R} \right) - \frac{f_z Z \sqrt{DH-H^2}}{\pi D}$$

PERÇAGE



$$f_z = \frac{1\,000 v_f}{NZ}$$

$$\text{à son plus grand diamètre, } \ell = \frac{\pi DH}{f_z Z}$$

Avec D (mm)	diamètre de l'outil,
H (mm)	épaisseur sciée ou profondeur de passe,
N (tr/min)	vitesse de rotation,
R (mm)	rayon de l'outil,
Z	nombre de dents ou de couteaux,
d (mm)	distance entre deux dents (pas du ruban),
e (e_m) (mm)	épaisseur du copeau (ou épaisseur moyenne),

f_z (mm)	pas d'usinage (ou avance de dent),
f	dépassement de l'outil,
h	position de l'outil au temps t (de 0 à H),
i	inclinaison de la trajectoire par rapport à la verticale,
ℓ (mm)	longueur du copeau,
v_c (m/s)	vitesse de coupe,
v_f (m/min)	vitesse d'avance.

2.4 Traces d'usinage

■ Travail en opposition

Après le passage des dents, la surface engendrée n'est pas plane, mais est constituée d'une succession d'ondes. La longueur de chaque ondulation, appelée *avance par dent* ou encore *pas d'usinage*, correspond à la distance parcourue par le bois entre les passages de deux dents successives.

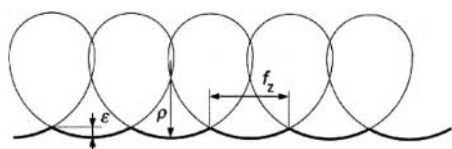
Pour faciliter l'explication, considérons tout d'abord que toutes les pointes des dents sont situées rigoureusement sur le même cercle : c'est l'outil parfait. Dans ces conditions, l'avance par dent, la profondeur de l'ondulation et le rayon de courbure sont déterminés par les formules du tableau 6.

■ Travail en avalant

La trajectoire de l'outil par rapport à la pièce est toujours une trochoïde, mais sa forme est modifiée. Il en découle une surface engendrée légèrement différente de la précédente. La valeur du pas d'usinage, correspondant à l'avance par dent, est identique à celle obtenue lors du travail en opposition, mais la profondeur de l'ondulation et le rayon de courbure sont modifiés (tableau 6).

Dans le travail en opposition, le rayon de courbure de l'ondulation est plus grand que le rayon de l'outil ; c'est l'inverse dans le travail en avalant.

Tableau 6 – État de surface observé pour les modes d'usinage les plus fréquents



Pas d'usinage (ou avance par dent) (en mm) :

$$f_z = \frac{1\,000 v_f}{NZ}$$

Profondeur de l'onde :

— usinage en opposition :

$$\varepsilon = \frac{f_z^2}{8 \left(R + \frac{f_z Z}{\pi} \right)}$$

— usinage en avalant :

$$\varepsilon = \frac{R}{8} \left(\frac{f_z Z}{R - \frac{f_z Z}{2\pi}} \right)^2$$

Rayon de courbure de l'ondulation (en mm) :

— usinage en opposition :

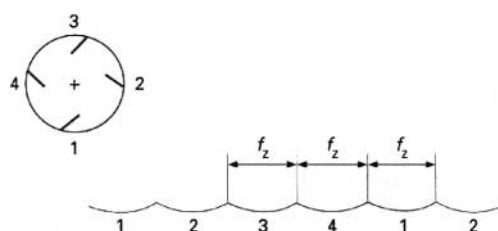
$$\rho = \frac{\left[R^2 + \left(\frac{f_z Z}{2\pi} \right)^2 + \frac{f_z Z}{\pi} (R - H) \right]^{3/2}}{R^2 + \frac{f_z Z}{2\pi} (R - H)}$$

— usinage en avalant :

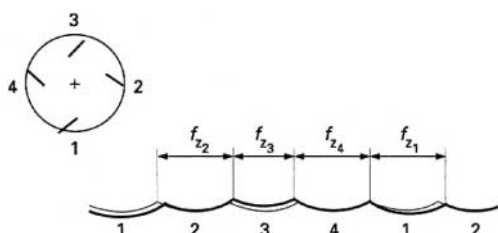
$$\rho = \frac{\left[R^2 + \left(\frac{f_z Z}{2\pi} \right)^2 - \frac{f_z Z}{\pi} (R - H) \right]^{3/2}}{R^2 - \frac{f_z Z}{2\pi} (R - H)}$$

avec v_f (m/min) vitesse d'avance,
 N (tr/min) vitesse de rotation,
 Z nombre de dents,
 R (mm) rayon de l'outil,
 H (mm) profondeur de passe.

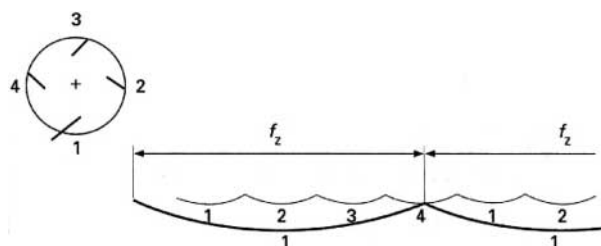
Outil parfait, outil réel : irrégularités



outil parfait : f_z régulier



2 couteaux légèrement déréglés : f_z irrégulier



1 couteau très déréglé laissant seul une marque :
 f_z régulier, mais égal à $4f_z$ théoriques

Dans la réalité, il est fréquent que les arêtes de coupe d'un même outil ne soient pas sur le même cercle de coupe : l'origine peut être un affûtage imprécis, du jeu entre l'arbre de la machine et l'alésage de l'outil, des roulements usés, etc. Dans ce cas, les traces des dents qui se succèdent à la surface de la pièce ne sont plus au même niveau, et il s'ensuit une irrégularité (tableau 6). Il faut éviter une telle situation, car la surface engendrée est inesthétique et, de plus, certaines dents travaillent et s'usent plus que d'autres. On se retrouve rapidement avec un outil aux dents inégalement usées, où les plus usées sont celles qui laissent leurs empreintes (car celles-ci sont en saillie).

Lorsque le décalage entre les dents s'accroît, une seule dent marque le bois. On retrouve alors une surface régulière, mais dont le pas est plus important. Les différentes formules sur les caractéristiques de l'onde restent valables, à condition de considérer que Z (nombre d'arêtes tranchantes) est égal à 1.

2.5 Formation du copeau

La connaissance de la formation du copeau est la base de l'approche scientifique de l'usinage. Mais peu de travaux ont été consacrés à l'étude de l'usinage du bois. On peut avancer l'hypothèse que le bois étant un matériau facilement usinable, contrairement à d'autres (métaux en particulier), il n'est pas apparu indispensable d'entreprendre de nombreuses recherches fondamentales sur ce thème. Mais les enjeux économiques actuels imposent aux entreprises d'être performantes dans tous les domaines et c'est ce qui explique que des recherches sur la coupe du bois soient engagées dans plusieurs universités et écoles d'ingénieurs.

2.5.1 Formation du copeau dans le bois massif

2.5.1.1 Copeau en usinage longitudinal : direction de coupe 90-0

C'est un mode d'usinage très répandu, puisqu'il concerne le rabotage, le toupillage, le fraisage, souvent le défonçage, etc. (figure 11).

Dans ce mode de coupe, le copeau ne peut se former que de trois façons différentes : par fendage, compression ou flambage. Pour faciliter la compréhension du processus, abordons tout d'abord l'usinage avec un mouvement de coupe rectiligne, puis avec un mouvement de coupe circulaire.

Mouvement rectiligne

La première façon de détacher un copeau est le fendage (figure 14a) : l'outil pénètre dans le bois en séparant la matière, grâce à une fente qui se propage en avant de l'arête de coupe. Cette fente peut être très longue (on fend une bûche avec un coin qui pénètre de quelques centimètres seulement) et se propage selon une direction que l'on ne maîtrise pas (c'est le plan de moindre résistance du bois). On obtient cette forme de copeau lorsque la composante normale de l'effort de coupe F_{fN} est supérieure à la cohésion de la matière (résistance du bois en traction perpendiculaire aux fibres). Il faut pour cela que l'effort de coupe forme un angle important avec la direction des fibres et que l'épaisseur du copeau soit suffisante pour que l'intensité de cette force dépasse la résistance du bois. Cette manière de réaliser un copeau ne peut qu'engendrer des éclats et des arrachements (figure 14a). Ce copeau est à éviter absolument.

Le copeau peut aussi s'obtenir par compression (figure 14b). Le bois est comprimé par l'outil jusqu'à la rupture des fibres. Pour obtenir une telle forme de copeau, il faut que l'effort de coupe soit voisin de la direction des fibres, ce qui signifie que la composante normale F_{fN} doit être très faible, voire même négative. Ce type de copeau est à rechercher car l'état de surface généré est bon, les fibres étant rompues par compression, mais aussi parce que la surface engendrée correspond exactement à la trajectoire de l'outil, ce qui est toujours l'objectif à atteindre. Cet effort F_{fN} est peu important lorsque l'angle de coupe γ est faible.

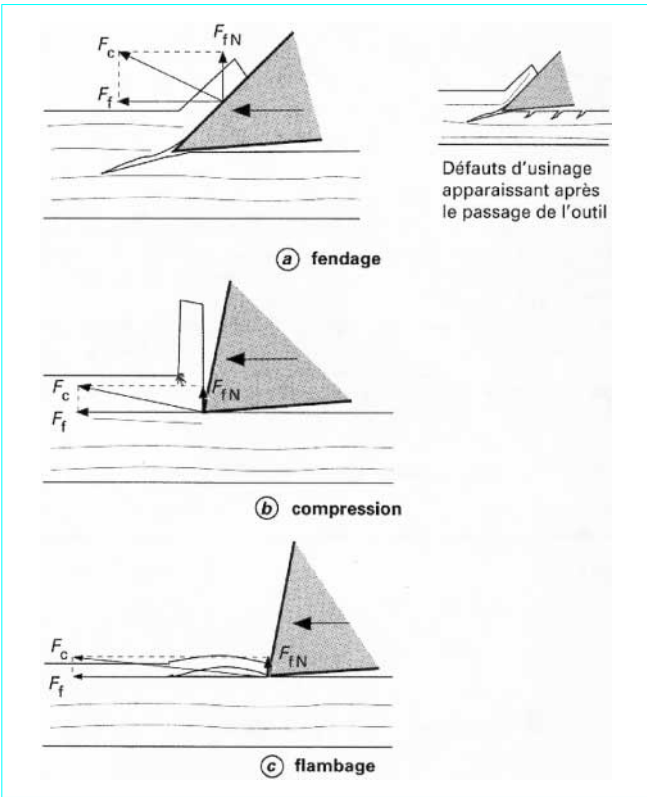


Figure 14 – Formation du copeau en mode 90-0 : mouvement rectiligne

La troisième forme de copeau s'obtient par flambage (figure 14c). Le flambage est la particularité (le défaut, diront les charpentiers, architectes et mécaniciens) qu'a une pièce élancée (longue et mince) de plier sous une charge axiale : elle ne se comprime pas mais fléchit, cette flexion entraînant la rupture. Pour obtenir cette forme de copeau, il faut donc réunir deux conditions : un copeau mince et un effort de coupe dont la composante axiale est prépondérante. Dans ce cas, le copeau se détache en avant de la dent mais, étant mince, le plan de rupture ne peut pas être très différent de celui défini par la trajectoire de l'outil. L'état de surface n'est pas excellent car, la rupture se faisant par arrachement de fibres, il en résulte un état de surface pelucheux. Bien que n'étant pas parfait, il est très acceptable car un ponçage très léger supprime cet inconvénient.

Le tableau 7 illustre l'influence des deux paramètres : l'angle de coupe γ et l'épaisseur du copeau e .

Tableau 7 – Influence des paramètres sur la formation du copeau		
Épaisseur de copeau e	Angle de coupe γ	
	faible	élevé
faible	flambage	fendage (peu d'éclats)
élevée	compression	fendage (1) (éclats nombreux et importants)

(1) À éviter absolument.

Lorsque le bois n'est pas de « droit fil », c'est-à-dire que ses fibres sont inclinées par rapport à la surface usinée, cet angle d'inclinaison peut modifier le type de copeau. En effet, le paramètre important est l'*angle de levage*, tel qu'il a été défini au paragraphe 1.2.2 : plus cet angle Φ est élevé, plus on engendre d'éclats. Tous les opérateurs savent qu'il est préférable d'orienter favorablement les bois avant de les travailler, mais ce n'est pourtant pas toujours possible, tant pour des raisons techniques qu'économiques.

■ Mouvement circulaire : le rabotage et les usinages équivalents

Par rapport à la coupe par mouvement rectiligne, la coupe par mouvement circulaire présente deux différences fondamentales : l'épaisseur de copeau est variable et la direction de l'effort de coupe change à chaque instant. Ces deux effets ont des conséquences sur la formation du copeau, mais confirment l'existence des trois types de copeau décrits précédemment (fendage, compression et flambage).

● **Travail en opposition** : le cycle de travail se décompose en trois phases (figure 15) :

- pendant la phase 1, le copeau est très mince, l'effort de coupe est peu incliné : les deux conditions nécessaires pour la formation de copeau par flambage sont réunies ;
- pendant la phase 2, l'épaisseur du copeau augmente, l'effort de coupe s'incline mais cet angle est encore limité, la composante F_{fN} est donc faible. Le copeau est ainsi formé par compression ;
- pendant la phase 3, le copeau commence à être assez épais, l'effort de coupe est nettement incliné. La composante F_{fN} est élevée. La coupe se fait par fendage.

Ces trois phases se succèdent et chacune d'entre elles est plus ou moins longue selon les caractéristiques du bois (essence, humidité, direction du fil), de l'outil (angle de coupe, état de l'arête de coupe) et des conditions de travail (épaisseur de copeau). Il est indispensable de retarder au maximum (et même d'éviter) l'apparition de la troisième phase. En effet, la fente qui se propage en avant de l'arête de coupe peut aller en deça du plan d'usinage. Elle n'est alors pas effacée par les coupes suivantes et un arrachement apparaît (figure 16). Lorsque ce défaut se manifeste, il faut réduire l'angle de coupe et/ou diminuer l'épaisseur de copeau.

Il est également souhaitable d'éviter une première phase trop longue, parce que la coupe n'est pas excellente et que l'on émousse rapidement les outils.

● **Travail en avalant** : dans ces conditions, ces trois phases n'existent plus, car le bois est toujours comprimé par l'outil. Dans un premier temps, qui couvre la quasi-totalité du cycle, la coupe se fait par compression car le copeau est épais et la composante normale de l'effort de coupe est négative. Arrivé sur la fin de sa trajectoire, le copeau est mince et une coupe par flambage peut apparaître.

L'absence de fendage explique pourquoi il n'y a pas d'arrachements, mais le travail des bois tendres par compression importante engendre un état de surface pelucheux. En raison de l'usure très rapide de l'outil et des chocs répétés, ce mode d'usinage n'est à envisager que pour quelques cas particuliers (par exemple, lorsque le travail en opposition entraîne des éclats importants).

2.5.1.2 Copeau en usinage transversal : direction de coupe 90-90

Ce mode d'usinage correspond au **tenonnage**, au **profilage en bout**, à **quelques cas de défonçage**, et au **sciage longitudinal**.

Étudions le processus de formation du copeau en profilage en bout. Schématiquement, on peut considérer que le bois est constitué par une juxtaposition de fibres. Chacune d'elles peut être assimilée à une poutre encastrée dans un matériau semi-élastique. Trancher une fibre revient à sectionner une poutre en appliquant un effort perpendiculaire à son axe. Selon que le point d'application de cet effort est proche ou éloigné du plan d'encastrement, on obtient une **rupture par cisaillement ou par flexion** (figure 17). La rupture obtenue par flexion se produit soit au point de contrainte maximale, soit à un endroit où les caractéristiques mécaniques sont plus faibles, mais jamais au point d'application de l'effort. Pour la coupe, où l'on souhaite que le plan de rupture corresponde à la trajectoire de l'outil, la rupture par flexion est inacceptable. Il faut donc faire en sorte que la rupture s'effectue uniquement par cisaillement.

La coupe par cisaillement se produit lorsque l'on empêche la flexion des fibres. En fait, le bois peut être considéré comme semi-élastique. Les fibres ne sont donc pas parfaitement encastrées, ce qui explique la difficulté à tenonner certaines essences aux accroissements très larges.

Dans le **travail en plein bois**, chaque fibre est maintenue par celles situées en aval. Lorsque la matrice ainsi constituée possède une résistance mécanique supérieure aux efforts de coupe, l'état de surface est correct. On distingue toutefois deux qualités de surface obtenues par cisaillement :

- la **cohésion du bois** est très forte et quelques rares fissures apparaissent lors du passage de l'outil. Ces fentes sont de dimensions réduites et se referment sitôt l'outil passé. L'état de surface est très bon (figure 18a) ;
- les **efforts de coupe** sont bien plus importants que la **cohésion inter-fibres**. Des fissures plus profondes apparaissent, et ne se referment pas après le passage de l'outil. Bien que la surface soit globalement plane, ces ruptures altèrent l'aspect de la surface (figure 18b) et certaines de ses caractéristiques mécaniques (cohésion superficielle).

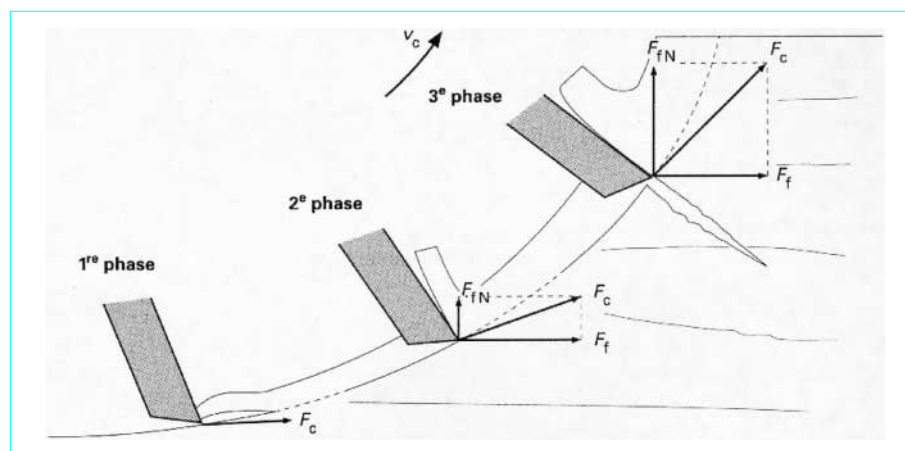


Figure 15 – Formation du copeau en mode 90-0 : mouvement circulaire

Lorsque la cohésion du bois est insuffisante, les fibres fléchissent et se cassent ailleurs qu'à l'endroit souhaité. Il s'ensuit une surface accidentée qui ne correspond pas à la trajectoire de l'outil. Enfin, si cette flexion est très grande, un second plan de rupture peut se produire sous l'outil (figure 18c).

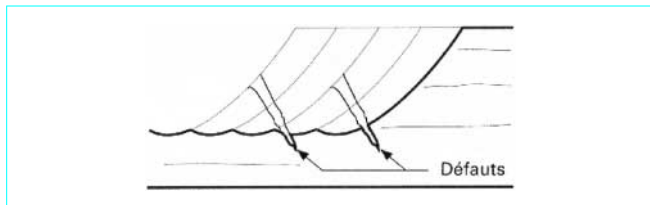


Figure 16 – Défauts d'usinage dus à la coupe par fendage

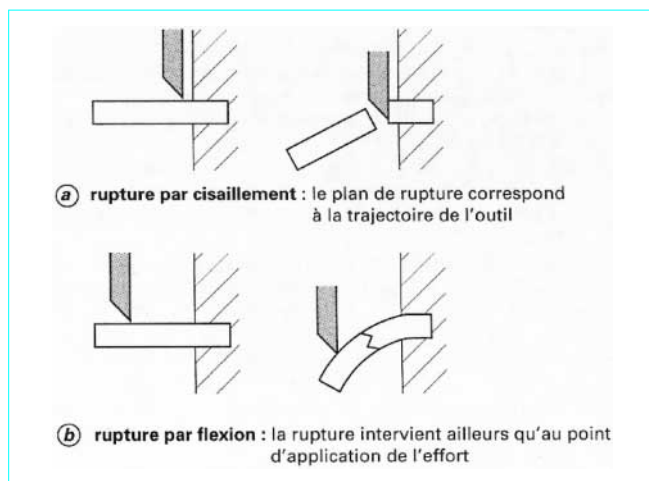


Figure 17 – Principe de la formation du copeau en profilage en bout (mode 90-90)

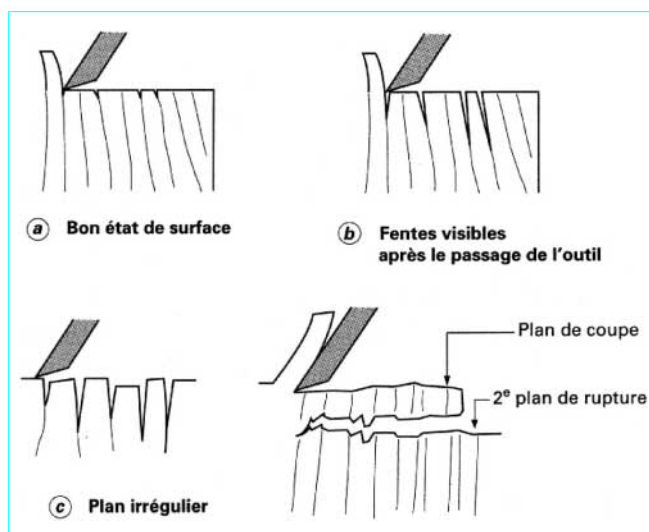


Figure 18 – État de surface en mode 90-90

Les meilleurs états de surface sont obtenus avec des bois durs et homogènes, dans lesquels les fibres ont une bonne cohésion. Il est préférable que l'angle de coupe soit le plus élevé possible (30° à 40° si possible). L'influence de l'épaisseur de copeau est assez faible.

En sortie d'outil, il n'y a plus (ou plus assez) de fibres pour soutenir celle(s) qui subit(ssent) la coupe. Elle(s) fléchit(ssent) et se casse(nt). C'est ainsi que naissent les éclats en sortie d'outil (figure 19).

2.5.1.3 Copeau en usinage tangentiel : direction de coupe 0-90

Ce mode d'usinage correspond essentiellement à **certaines formes de tournage** ou au **tenonnage avec outils dérouleurs**. Les applications industrielles sont très limitées, et c'est ce qui explique que peu d'études traitent ce mode de travail. Il a, par contre, été analysé par de nombreux laboratoires dans le cadre du **tranchage** ou du **déroulage**.

Le copeau est formé, théoriquement, sans que les fibres soient coupées. En effet, l'effort axial comprime les fibres qui se désolidarisent les unes des autres, au niveau du plan de coupe.

Un *angle de coupe faible* (5 à 10°) engendre une force axiale F_f importante, alors que l'effort normal F_{fN} peut être négatif. Les copeaux se fragmentent. L'état de surface est pelucheux.

Un *angle de coupe élevé* (30° et plus) permet d'obtenir un copeau long (parfois même continu) avec des efforts de coupe réduits. L'état de surface est amélioré.

Un *copeau mince* engendre un meilleur état de surface, grâce à sa plus grande souplesse.

2.5.2 Formation du copeau dans les panneaux

Bien que leur matériau de base soit le bois, les panneaux, du fait de leur conception spécifique, ont un comportement à l'usinage très différent de celui du bois massif. Ainsi, les règles d'usinage définies au paragraphe 2.5.1 s'appliquent avec quelques particularités selon les types de panneaux.

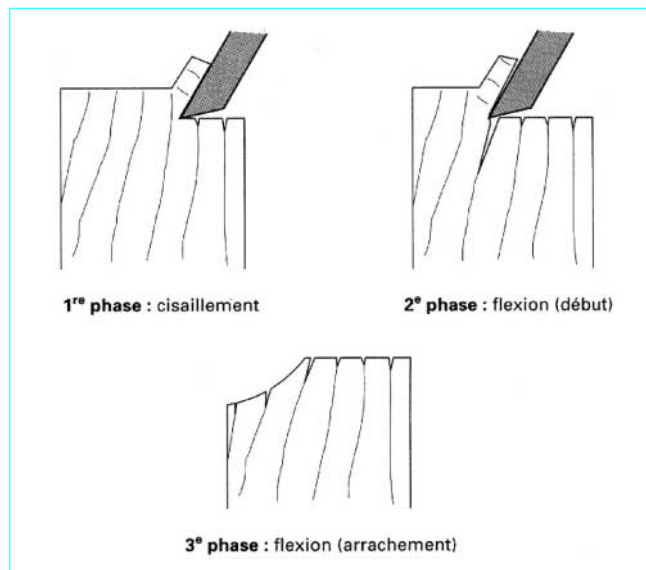


Figure 19 – Genèse des arrachements : éclats en sortie d'outil

2.5.2.1 Usinage des chants

■ **Panneaux contreplaqués** : ces panneaux sont constitués de placages de bois collés à fil croisé. Quel que soit le chant usiné, on coupe des plis orientés en long et d'autres en travers. La cohésion des fibres est améliorée par la conception en sandwich, c'est pourquoi le fraisage de ces panneaux présente peu de difficultés. Le choix de l'outil (angle de coupe en particulier) est imposé par le sens du pli extérieur (en long ou en travers).

■ **Panneaux lattés** : ce sont des lattes collées chant contre chant, et revêtues sur chaque face d'un placage. Leur conception leur confère un comportement proche de celui du bois massif. Les lois de l'usinage du bois massif s'appliquent donc pleinement.

■ **Panneaux de particules, de fibres et MDF (Medium Density Fiberboard)** : pour ces panneaux, l'orientation des fibres est plus ou moins aléatoire. Les difficultés d'usinage résident :

- dans la variation de cohésion entre les faces et l'âme (surtout pour les panneaux épais) ;
- les arrachements dans les angles ;
- la fragilité des revêtements décoratifs appliqués sur les faces.

2.5.2.2 Usinage perpendiculaire aux faces (perçage, sciage par exemple)

Des arrachements à la sortie de l'outil sont à craindre. En effet, la composante axiale de l'effort de coupe engendre un effort de traction perpendiculaire aux faces, contrainte mal supportée par les panneaux, ce qui génère des arrachements. Là encore, si ces défauts se présentent, il faut :

- diminuer l'angle de levage Φ , en diminuant l'angle de coupe et en modifiant la position de la scie par rapport au panneau ;
- diminuer l'épaisseur de copeau ;
- éventuellement, installer un pare-éclats ;
- travailler avec deux outils, un tournant en opposition et l'autre en avalant.

Ces points sont développés dans les différents paragraphes consacrés aux différentes formes d'usinage (article *Travail mécanique du bois. Principales opérations d'usinage* [B 7 306]).

2.6 Puissance

L'énergie absorbée par la coupe est égale au travail de l'ensemble des forces s'exerçant sur l'outil. La puissance correspond au volume de matière transformée en copeaux, par seconde, multiplié par l'énergie de coupe par unité de volume E_c .

Ce facteur E_c est fonction des paramètres liés au matériau et aux conditions de travail. Le résultat du calcul ne doit jamais être considéré comme une valeur exacte, ni même approchée, mais uniquement comme un ordre de grandeur pour les raisons suivantes :

- les valeurs de E_c ont été mesurées sur des pièces de bois exemptes de défauts, ce qui n'est pas toujours le cas en production ;
- les caractéristiques physiques et mécaniques d'une même essence sont variables en fonction de nombreux facteurs liés aux conditions de croissance de l'arbre ;
- souvent, les usinages ne se font pas selon une des trois directions principales (axiale, tangentielle et radiale) mais suivant une direction intermédiaire ;
- les paramètres liés à l'outil : angle de coupe, angle de dépouille, état de fraîcheur des arêtes tranchantes, nature du matériau de coupe, etc. ne sont pas pris en compte, alors qu'ils ont une importance considérable.

Un modèle mathématique qui prendrait en compte l'ensemble de ces paramètres serait très complexe. De plus, il ne présenterait qu'un intérêt mineur, du fait de l'impossibilité de maîtriser l'ensemble des conditions de travail (matériau et outil compris).

Pourtant, effectuer ce calcul est profitable. Les résultats permettent en effet de concevoir des machines (puissance des moteurs, dimensionnement des organes mécaniques) autrement que par l'essai ou le tâtonnement. Naturellement, le résultat est affecté de ce qu'il est convenu d'appeler un coefficient de sécurité. Le tableau 8 indique les valeurs approximatives de E_c pour les modes d'usinages les plus courants, en établissant une distinction entre les essences de densité inférieure ou supérieure à 0,70.

Tableau 8 – Valeurs approximatives de l'énergie de coupe par unité de volume E_c (en 10^{-3} J/mm³) pour les modes d'usinage les plus courants (1)

Types de travaux (2)			A	B	C	D	E	F	G	H
Modes de coupe			90-0	90-30	90-60	90-90	0-30	0-60	0-90	90-0
Épaisseur du copeau <i>e</i> (mm)	0,05	densité < 0,70	58	88	117	147	78	98	117	39
	0,10		34	58	78	93	53	70	78	19
	0,20		19	39	58	68	29	44	58	14
	0,30		16	29	44	58	22	32	49	9
	0,40		9	24	29	53	19	29	44	7
	0,05	densité > 0,70	68	117	137	157	98	117	137	33
	0,10		39	68	88	107	63	73	98	23
	0,20		22	44	68	78	34	53	68	14
	0,30		18	38	52	63	26	39	52	11
	0,40		13	34	47	56	21	34	49	9

(1) Valeurs pour une humidité de 12 %.

(2) A dégauchissage, rabotage et défonçage de fil par faible passe.

B rabotage et défonçage de fil par forte passe.

C délignage à la scie circulaire.

D toupillage en bout, délignage au ruban, défonçage (rainures) et mortaisage de bois de fil à la mèche.

E tenonnage par outils dérouleurs.

F tronçonnage à la scie circulaire.

G tronçonnage au ruban.

H déroulage.

Ces valeurs permettent de calculer la puissance de coupe P_c par la formule suivante :

$$P_c = \ell H v_f E_c / 60$$

avec E_c (J/mm³) énergie de coupe par unité de volume,
 H (mm) profondeur de passe (ou épaisseur sciée),
 P_c (kW) puissance de coupe,
 ℓ (mm) largeur de copeau,
 v_f (m/min) vitesse d'avance.

En comparant les résultats obtenus en faisant varier l'épaisseur de copeau, on s'aperçoit que, lorsque l'épaisseur croît, la puissance augmente, mais que l'énergie absorbée E_c diminue. Cela signifie que, toutes conditions égales par ailleurs, il est plus économique d'usiner avec des copeaux épais, bien qu'il faille installer un moteur plus puissant. Cette contradiction apparente s'explique par le fait que le produit *puissance par temps d'usinage* diminue lorsque l'épaisseur des copeaux augmente.

N'oublions pas que la puissance ainsi calculée est celle nécessaire pour détacher les copeaux, mais qu'il faut y ajouter toutes celles utiles pour vaincre les frottements divers.

3. Usure des arêtes tranchantes

L'usure de l'outil est un phénomène inéluctable qui se traduit par une modification lente de la forme de ses arêtes tranchantes.

La vitesse d'évolution du processus varie selon les matériaux (outil et pièce) et les conditions de travail.

3.1 Origines de l'usure

Pendant longtemps, on a considéré que cette dégradation était causée par l'abrasion due au frottement du bois, qui se comporte un peu comme une meule. Actuellement, on sait que cette usure d'origine mécanique n'est pas seule en cause ; elle peut même être faible vis-à-vis d'autres formes d'usure, électriques ou chimiques.

Lors de la pénétration de la dent dans le matériau usiné, les frottements sont considérables. Ils occasionnent une élévation de température à la pointe de la dent pouvant atteindre et même dépasser 500 °C. Bien sûr, cette température n'est atteinte que pendant quelques millisecondes. En effet, sitôt le copeau détaché, la dent est refroidie par l'air ambiant (convection) et le corps de l'outil, qui fait office de radiateur (conduction).

■ Usure mécanique

Certains bois massifs et de nombreux matériaux composites sont chargés de grains de silice (SiO₂) qui vont détacher de la dent de minuscules particules. Cette action sera d'autant plus rapide que le matériau travaillé aura une abrasivité élevée et que sa densité sera forte (les grains de silice sont plus agressifs car mieux encastrés). Ce phénomène est aggravé par l'élévation de température qui altère les caractéristiques mécaniques de certains matériaux de coupe. Une grande dureté de l'outil (surtout à la température de travail) est un gage de meilleure tenue de coupe.

Il arrive également que des chocs répétés (vibrations) finissent par fissurer la dent, jusqu'à ce que de fines particules de métal se détachent. Sur ce plan, les matériaux frittés (carbures) sont plus sensibles que les alliages à cause de leur hétérogénéité.

■ Usure par électroérosion

Les frottements intenses, la température élevée et la présence d'eau dans le bois engendrent des champs électriques qui peuvent atteindre 1 500 V. Des particules de métal sont alors arrachées à la dent, un peu comme, au soudage, l'arc électrique prélève du métal sur une électrode pour le transférer sur la pièce. Les matériaux de coupe peu conducteurs sont moins sensibles à cette forme d'usure.

■ Usure physico-chimique

L'usinage de produits humides avec des métaux et alliages composés d'éléments corrodables dans des conditions thermiques défavorables entraîne une oxydation qui diminue la résistance à l'usure de la dent. Les alliages ferreux sont particulièrement sensibles à ce phénomène.

3.2 Formes d'usure

Selon les conditions de travail et les matériaux en présence, l'usure altère davantage une des faces de coupe ou de dépouille, ou les deux de façon équilibrée.

■ Usure prépondérante sur la face de coupe

Elle est due aux frottements du copeau sur cette face. Pour un même matériau de coupe, elle est élevée lorsque :

- le copeau est épais ;
- le bois est dense ;
- l'angle de coupe est faible.

■ Usure prépondérante sur la face de dépouille

Elle trouve son origine dans les frottements de la dent sur la surface fraîchement usinée. En effet, une des composantes de l'effort de coupe tend à comprimer la matière. Sitôt l'outil passé, la relaxation des contraintes entraîne un *gonflement du bois*, qui arrive en contact avec l'outil. Ces frottements, donc cette forme d'usure, sont aggravés avec :

- l'augmentation de la compressibilité de la matière usinée (bois tendres) ;
- la diminution de l'angle de dépouille ;
- l'augmentation de l'humidité ;
- un usinage par copeaux minces ;
- une arête de coupe émoussée.

■ Usure équilibrée entre les faces de coupe et de dépouille

C'est la forme d'usure optimale. Elle permet, grâce à sa répartition sur les deux faces, de retarder l'instant de l'arrêt pour remise en condition de l'outil.

3.3 Conséquences de l'usure

La conséquence directe de l'usure de l'arête tranchante est la disparition progressive de sa capacité à couper les fibres. Il s'ensuit inévitablement une **augmentation des efforts de coupe** et une **dégradation de l'état de la surface usinée**, qui peut se manifester par :

— des *traces de brûlage* : en dépouille, la surface de contact entre la dent et le bois augmente, ainsi que les frottements, ce qui entraîne une élévation de la température qui peut dépasser le seuil de carbonisation. Outre l'inconvénient esthétique, ce brûlage modifie les caractéristiques de la surface, ce qui altère ses performances (réduction de la résistance du collage par exemple) ;

— des *éclats et écaillages* : les revêtements décoratifs plaqués sur les panneaux sont très sensibles à l'altération des arêtes de coupe, et sont détériorés sitôt que l'outil perd ses propriétés tranchantes ;

— une *augmentation des efforts de coupe* : l'effort nécessaire pour faire pénétrer la dent dans le bois croît en même temps que son arête s'émousse. Sur les machines manuelles, l'opérateur ressent cette augmentation et il agit en conséquence, en ralentissant la vitesse d'avance ou en changeant l'outil. Par contre, sur certaines machines automatiques très puissantes, l'installation d'un ampère-mètre évitera à un opérateur peu attentif des désordres assez graves ;

— une *surface irrégulière* : sous l'action d'efforts de compression de plus en plus grands, lors du passage de l'outil, les zones les plus tendres vont se comprimer davantage que les zones dures, et ces contraintes vont se relaxer sitôt l'outil passé. Sur le bois à structure hétérogène, les écarts entre le bois d'été et le bois de printemps sont alors marqués ;

— une *surface pelucheuse* : les fibres ne sont pas coupées franchement, mais sont plutôt arrachées. Les essences tendres nécessitent des arêtes en parfait état, car elles sont les plus sensibles à ce phénomène ;

— une *déviations de la trajectoire de l'outil dans le bois* : une lame de scie à ruban, voire même une scie circulaire, est un outil mince. Elle aura tendance à dévier dès que les efforts qui lui sont appliqués dépassent le seuil acceptable.

Si on n'a pas pris les mesures qui s'imposent (arrêt de la machine, démontage de l'outil), on risque des accidents : des plaquettes qui se débrassent (scie circulaire), une pointe de dent qui se retourne (scie à ruban), une rupture d'outil (fraise de défonçage), etc.

Le **recul de l'arête de coupe**, dû à l'usure, se traduit inéluctablement par une modification de la position de l'arête par rapport au bois, donc par une évolution de la cote. Mais cette modification est très faible (quelques micromètres, tout au plus quelques centièmes de millimètre) et n'est généralement pas la cause de l'arrêt pour affûtage ou changement des plaquettes. En effet, à quelques rares exceptions près, la dégradation des états de surface ou l'augmentation de l'énergie de coupe se manifestent bien avant que les cotes changent significativement. Par contre, l'affûtage répété entraîne des modifications dimensionnelles qui sont parfois la cause de la mise au rebut de l'outil.

L'**usure des outils coûte cher** et justifie les recherches effectuées pour adapter des matériaux de coupe sans cesse plus performants au matériau usiné et aux machines actuelles.

Le coût de l'usure a plusieurs origines qui peuvent s'additionner :

- le *rebut de pièces usinées* : lorsque la surveillance n'est pas constante, l'usure de l'outil peut engendrer des défauts (arrachements de fibres, écaillage du revêtement, déviation de lame, etc.) tels que le déclassement des pièces s'impose ;
- la *perte de production* due à l'arrêt de la machine ou de la chaîne d'usinage pour le remplacement de l'outil ou de ses arêtes de coupe ;
- le *coût de l'affûtage ou des plaquettes de rechange* ;
- le *coût de remplacement des outils réformés* ;
- l'*investissement dans 2 ou 3 jeux d'outils identiques* pour pallier l'immobilisation due à l'affûtage ;
- le *temps passé au réglage de la machine après affûtage* ;
- les *accidents endommageant les outils lors de ces manutentions* ;
- etc.

3.4 Comment limiter l'usure

Les différents facteurs pouvant limiter l'usure sont la vitesse de coupe, l'épaisseur du copeau et le sens de travail quant au mode d'usinage, les facteurs liés au matériau ayant déjà été vus au paragraphe 1.4. On peut bien entendu cumuler les effets favorables liés à chacun d'entre eux.

■ Vitesse de coupe

Les frottements pièce/outil sont à l'origine de l'usure. L'élévation de température qui s'ensuit est un facteur déterminant, car les caractéristiques physico-mécaniques des matériaux de coupe sont toujours plus ou moins altérées. Cette élévation de température est directement fonction de la vitesse relative entre la pièce et l'outil.

Pour une avance par dent constante, la production est proportionnelle à la vitesse d'avance, donc à la vitesse de coupe. On cherche en permanence à augmenter cette vitesse. Mais il faut savoir que les temps improductifs limitent plus ou moins cet avantage. Par contre, **l'usure augmente également avec cette même vitesse, parfois de façon très rapide** (figure 20).

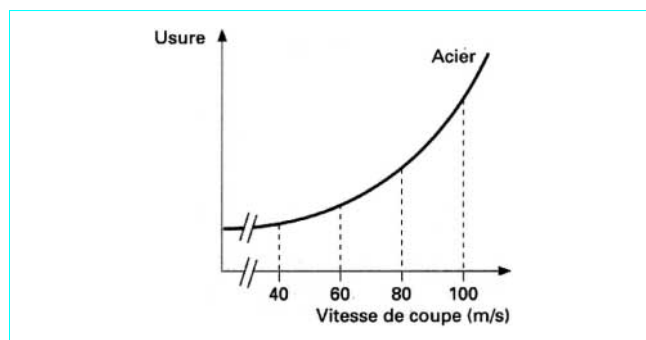


Figure 20 – Évolution de l'usure avec la vitesse de coupe

En choisissant une vitesse de coupe plus élevée, on augmente la production, mais aussi la rapidité de l'usure. Il faut donc trouver le bon compromis pour satisfaire ces deux conditions contradictoires. Chaque machine par son coût horaire, chaque type d'outil par sa conception, chaque matériau usiné par son abrasivité et chaque matériau de coupe par sa résistance à l'usure influent sur le choix de la vitesse de coupe, dans le respect des règles de sécurité. Il est recommandé, lorsque l'outil et la machine le permettent, de choisir une vitesse comprise entre 40 et 70 m/s.

■ Épaisseur de copeau

Limiter la durée des frottements entre la pièce et l'outil revient à diminuer l'usure. Il faut donc limiter le chemin d'usure, qui est la distance cumulée pendant laquelle l'arête de coupe est en contact avec la pièce usinée. À outil et conditions de travail identiques, ce chemin d'usure est inversement proportionnel à l'épaisseur des copeaux ; **augmenter l'épaisseur des copeaux revient donc à diminuer l'usure.**

Ce raisonnement s'applique aux différentes formes d'usinage et pour tous les matériaux, tant que les copeaux sont fins et moyens. En effet, les efforts de coupe croissant avec l'épaisseur des copeaux, ils arrivent, lorsqu'ils sont suffisamment intenses, à dépasser la résistance mécanique de la pointe de la dent et à retourner l'arête de coupe. Ce processus de destruction de l'outil n'est, bien sûr, pas de l'usure, mais la manifestation pour l'opérateur est identique : l'outil *ne coupe plus*. Ces conditions sont remplies lorsque l'on travaille par copeaux épais dans un bois dur avec un outil à faible angle de taillant. Ce retournement de l'arête n'est pratiquement observé qu'au sciage au ruban.

En fait, les inconvénients majeurs qui limitent le travail par copeaux épais sont l'altération de la qualité de la surface usinée et la nécessité de disposer d'une puissance importante.

■ Sens de travail

Le travail en avalant engendre des chocs puisque l'outil pénètre brutalement dans le matériau usiné. Ces chocs sont d'autant plus intenses que les copeaux sont épais et que le matériau est dur. La fréquence des vibrations induites est égale au nombre de coupes par seconde, soit :

$$f = NZ/60$$

avec f (Hz) fréquence,
 N (tr/min) vitesse de rotation,
 Z nombre d'arêtes tranchantes.

Ces chocs répétés finissent par fragiliser le matériau de coupe, qui peut être détruit par fissuration et détachement de particules de métal.

Le travail en avalant diminue sensiblement la durée de coupe des outils, surtout lorsqu'ils sont réalisés en matériaux frittés (carbure de tungstène par exemple). Il est préférable d'utiliser des matériaux sensibles aux chocs (diamant par exemple) lors du travail en opposition.

Mise en œuvre et usinage du bois

par **François PLASSAT**

Ingénieur de l'École Supérieure du Bois

Chef de la section Meubles au Centre Technique du Bois et de l'Ameublement (CTBA)

et **Jacques JUAN**

Ingénieur des Arts et Métiers

Chef de section au Centre Technique du Bois et de l'Ameublement (CTBA)

Filière bois française en quelques chiffres

Production annuelle de bois

Exploitation : 40 à 50 millions de m³ dont :

— autoconsommation : 10 à 20 millions de m³ ;

— commercialisation : 30 millions de m³ dont :

- 10 de bois d'industrie,
- 20 de bois d'œuvre.

Nota

— Filière bois : ensemble des activités économiques que suscitent la gestion forestière, l'exploitation des coupes et la transformation industrielle du bois.

— Bois d'industrie :

- bois pour poteaux, traverses (PTT, SNCF) ;
- bois pour trituration (pâte à papier) ;
- bois pour panneaux de particules ou de fibres.

— Bois d'œuvre :

- bois pour le déroulage (cagettes, contreplaqués, etc.) ;
- bois pour le tranchage (ameublement) ;
- sciages pour le bâtiment, l'ameublement, le bricolage.

Économie par activité (entreprises, emplois, valeurs ajoutées annuelles) (étude CERNA Écoles des Mines)

Activité	Entreprises	Emplois	Valeur ajoutée (milliards de F)
Sylviculture	3 500 (1)	44 000	4,6
Exploitation forestière	8 400	20 000	2
Pâtes à papier	20	6 000	1
Scierie	4 800	30 000	3,2
Tranchage, déroulage et panneaux	400	15 000	1,8
Papiers, cartons	1 300	100 000	14
Bois bâtiment	53 000	160 000	19,4
Ameublement	18 000	120 000	10,5
Travail divers du bois	4 200	55 000	9,1

(1) On recense 3 500 professionnels de la forêt sur 3,7 millions de propriétaires forestiers.

Bibliographie

Référence

- [1] KOCH (P.). – *Wood machining processes*. The Ronald Press Company, New York (1964).

Centre Technique du Bois et de l'Ameublement

COLLARDET (J.) et BESSET (J.). – *Bois commerciaux. Tome 1 : les résineux*. 260 p., éd. Vial/CTBA (1987); *Tome 2 : feuillus des zones tempérées*. 400 p., éd. Vial/CTBA (1992).

Principaux bois utilisés en France. 44 p. (1983).

Coffret bois de France (1989).

Coffret panneaux dérivés du bois (1989).

Guide pour le choix des bois en menuiserie. 162 p. (1985).

Guide pour le choix des bois en ébénisterie. 99 p., 2nd éd. (1980).

Comment bien usiner le bois. 140 p. (1993).

Technologie du déroulage. 64 p., déc. 1979.

La scie à ruban. 152 p., éd. CTFT (1990).

MDF. Guide d'utilisation. 160 p. (1993).

Finition des ouvrages en bois dans le bâtiment. 128 p. (1994).

Ameublement et produits de finition. 95 p. (1991).

L'Europe du bois. 20 p., éd. Eurologica (1992).

Autres références

CAMPREDON (J.). – *Le bois*. 128 p. (coll. Quesais-je ? n° 382), éd. Presses Universitaires de France (1969).

TOUCHARD (Y.) et MEYER (A.). – *Comment choisir son bois ?* Bischwiller, 142 p., éd. Kity (1980).

Pense précis bois. 564 p., Association des anciens élèves de l'École Supérieure du Bois, éd. Vial (1984).

Le grand livre international du bois. 276 p., éd. Nathan (1977).

Lignum Zurich. *Documentation bois* :

- Bases technologiques ;
- Bases physiques ;
- Projet et exécution ;
- Préservation du bois ;
- Traitement des surfaces.

HAYWARD (C.). – *Les assemblages du bois*. 135 p., éd. Eyrolles (1979).

SOMMEP – *Utiliser le bois. Matériaux, outils, assemblages et réalisations simples*. 148 p., éd. Dunod (1982).

HEURTEMATTE (G.), POUZEAU (P.), ORUS (M.) et LE SAGE (R.). – *Usinage du bois*. 128 p., éd. Libr. Delagrave (1985).

LIEBAULT (J.Y.). – *Manuel pratique : l'usinage bois*. 189 p., éd. Dunod (1983).

Normalisation

Association Française de Normalisation (AFNOR)

Bois

NF B 50-001	1-71	Bois. Nomenclature.
NF B 50-002	8-61	Bois. Vocabulaire.
NF B 50-003	4-85	Bois. Vocabulaire (seconde liste).
B 50-004	4-69	Contreplaqué. Vocabulaire (EQV ISO 2074).
NF EN 335-1	10-92	Durabilité du bois et des matériaux dérivés du bois. Définition des classes de risque d'attaque biologique. Partie 1 : généralités (indice de classement : B 50-100-1).
NF EN 335-2	10-92	Durabilité du bois et des matériaux dérivés du bois. Définition des classes de risque d'attaque biologique. Partie 2 : application au bois massif (indice de classement : B 50-100-2).
B 52-001-5	5-92	Règles d'utilisation du bois dans les constructions. Partie 5 : caractéristiques mécaniques conventionnelles associées au classement visuel des principales essences résineuses et feuillues utilisées en structure.
EXP B 53-100	7-88	Bois. Sciages de bois résineux et feuillus tendres. Dimensions nominales. Sections et longueurs.
EXP B 53-520	7-88	Bois. Sciages de bois résineux. Classement d'aspect. Définitions des choix.
EXP B 52-521	12-91	Bois. Sciages feuillus durs tempérés. Classement d'aspect.
NF EN 309	10-92	Panneaux de particules. Définition et classification (indice de classement : B 54-101).
NF B 54-110	10-85	Panneaux de particules. Caractéristiques dimensionnelles.
NF B 54-113	5-91	Panneaux de particules surfacés mélaminés. Spécifications.
NF B 54-150	12-88	Contreplaqué. Classification. Désignation.
NF EN 313-1	10-92	Contreplaqué. Classification et terminologie. Partie 1 : classification (indice de classement : 54-151-1).
NF B 54-154	10-78	Contreplaqué à plis. Types de collage. Définitions. Essais. Qualification.
NF B 54-160	7-70	Contreplaqué à plis (d'usage général). Caractéristiques dimensionnelles des panneaux.
NF B 54-170	12-71	Contreplaqué à plis (d'usage général). Règles générales de classement d'aspect.

NF B 54-171 12-71 Contreplaqué à plis (d'usage général). Classement d'aspect des panneaux à plis extérieurs d'essences feuillues tropicales.

NF B 54-172 9-73 Contreplaqué à plis (d'usage général). Classement d'aspect des panneaux à plis extérieurs en pin maritime.

NF B 56-010 10-80 Panneaux fibragglo. Définitions. Désignation.

NF B 56-029 10-80 Panneaux fibragglo. Spécifications.

Outillage coupant

NF ISO 513 5-92 Application des matériaux durs de coupe pour usinage par enlèvement de copeaux. Désignation des groupes principaux d'enlèvement de copeaux et des groupes d'application (indice de classement : E 66-304).

NF ISO 3002-1 12-93 Grandeurs de base pour la coupe et la rectification. Partie 1 : géométrie de la partie active des outils coupants. Notions générales, système de référence, angles de l'outil et angles en travail, brise-copeaux (remplace NF E 66-501, nov. 78, E 66-502, déc. 78 et E 66-503, mars 76).

NF E 66-506 6-85 Grandeurs de base en usinage et rectification. Grandeurs géométriques et cinématiques en usinage.

Outillage tranchant. Outillage à bois

NF E 66-507 6-85 Grandeurs de base en usinage et rectification. Forces, énergie et puissance.

NF E 73-010 7-84 Lames de scies à bois. Forme du profil de la denture. Terminologie et désignation (EQV ISO 7294).

EXP E 73-044 4-80 Scies circulaires à bois à mises rapportées en métal dur.

EXP E 73-500 11-80 Outils rotatifs à bois anti-rejet. Essai des outils à limitation continue du pas d'usinage pour le fraisage du bois déplacé à la main.

NF E 73-504 12-84 Outillage mécanique à bois. Équilibrage des fraises à bois à alésage.

Produits de protection du bois

EXP T 72-081 9-91 Produits de protection du bois. Lasures. Spécifications.

International Organization for Standardisation ISO

ISO 1940-1 1986 Vibrations mécaniques. Exigences en matière de qualité dans l'équilibrage des rotors rigides. Partie 1 : détermination du balourd résiduel admissible.