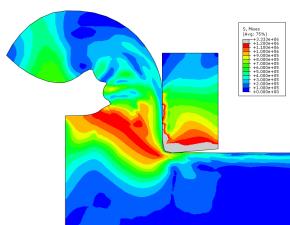


CI 6 – PPM – PRODUITS PROCÉDÉS MATÉRIAUX

ÉLABORATION DES PIÈCES MÉCANIQUES. INTRODUCTION DE LA CHAÎNE NUMÉRIQUE.

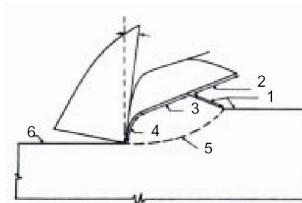
CHAPITRE 11 – USINAGE – ÉTUDE DE LA COUPE

D'après documents de Jean-Pierre Pupier



Modélisation de la formation du copeau^a

a. <http://www.geniemeca.fpms.ac.be>



- 1 : surfaces non déformées,
- 2 : zone de la surface rompue par cisaillement catastrophique, séparée du segment suivant,
- 3 : bande de cisaillement intense due au cisaillement catastrophique pendant l'étape précédente,
- 4 : surface fortement cisaillée,
- 5 : situation de la prochaine bande de cisaillement intense
- 6 : surface fine

A l'interface entre la pièce et l'outil, se produisent des phénomènes complexes dont l'outil est le principal acteur. Ce sont les phénomènes de coupe. Il importe donc de connaître :

- les principaux matériaux constitutifs des outils ;
- les phénomènes d'usure ;
- la géométrie des outils ;
- les efforts s'exerçant sur ces derniers.

SAVOIRS :

- Connaître la technologie élémentaire des éléments coupants (géométrie, matériaux)
- Définir une puissance de coupe

1	Les matériaux à outils	2
1.1	Analyse du besoin d'un outil	2
1.2	Matériaux des outils	2
1.3	Désignation des plaquettes et des portes plaquettes	6
2	L'usure des outils	7
2.1	Pourquoi l'étude de cette usure est-elle importante ?	7
2.2	Les mécanismes de l'usure	8
2.3	Les manifestations de l'usure	8
2.4	Informations sur les lois expérimentales d'usure	10
3	La géométrie des outils	11
3.1	Généralités	11
3.2	Les plans de l'outil	12
3.3	Définition des angles	14

4	Étude de géométries courantes d'outil	15
4.1	Cas du tournage	16
4.2	Cas du fraisage	16
4.3	Cas du perçage	17
5	Efforts et puissance de coupe	17
5.1	Théorie de Merchant	17
5.2	La théorie d'Albrecht	18
5.3	Modèle pratique - mise en place des efforts	19
6	Puissance de coupe	19
6.1	Influence des différents paramètres sur l'effort de coupe	20
6.2	Puissance réellement consommée	21

Ce document évolue. Merci de signaler toutes erreurs ou coquilles.

1 Les matériaux à outils

1.1 Analyse du besoin d'un outil

Pour avoir une bonne tenue à la coupe on demande principalement à un outil :

- la dureté à froid et surtout la dureté à chaud ;
- la résistance à l'usure ;
- la ténacité (possibilité de se déformer avant rupture et résistance à la déformation plastique).

Il peut également tenu compte de :

- l'usinabilité (problème d'affûtage) ;
- la conduction thermique ;
- la résistance à l'oxydation et à la décarburation ;
- l'indéformabilité.

1.2 Matériaux des outils

1.2.1 Les aciers rapides

Ce sont des aciers fortement alliés dont la teneur en carbone dépasse 0,7%. Ces aciers sont trempés.

Leur domaine d'emploi va du travail d'ébauche à la finition quel que soit le type de machines. Actuellement ils sont la plupart du temps remplacés par les outils en carbure sauf dans le cas des outils de forme à profil complexe. Il est en effet possible de les affûter grâce à une meule. Leur vitesse « standard éducation nationale » de coupe est de 25 m/min pour l'usinage des aciers courants.

Les différents éléments d'addition des aciers rapides

Élément	Symbole	Pourcentage	Influence
Carbone	<i>C</i>	1,75% maxi	Influe sur la dureté au détriment de la ductilité.
Tungstène	<i>W</i>	6 à 18%	Donne une bonne résistance à l'usure, affine le grain et maintient la dureté à chaud.
Molybdène	<i>Mo</i>	0,5% à 9%	Remplace le tungstène. Il permet d'obtenir une meilleure ductilité mais l'acier devient sensible à la décarburation et la fourchette de trempe sera plus étroite.
Vanadium	<i>V</i>	1 à 5%	Élément d'alliage le plus important car il forme avec le carbone un carbure plus dur que les autres ce qui permet d'avoir une grande résistance à l'usure.
Chrome	<i>Cr</i>	4%	Influe la capacité de trempe de l'acier et sa résistance au revenu.
Cobalt	<i>Co</i>	5 à 10%	Permet d'augmenter la dureté à chaud.
Manganèse	<i>Mn</i>		Évite les déformations des aciers.

1.2.2 Les carbures

Ce sont des carbures métalliques frittés pour la plupart. La dureté est proche de celle du diamant. Ce sont les outils d'aujourd'hui. De plus le système de plaquettes jetables permet des gains de productivité appréciables : plus d'affûtage, outil pouvant se passer d'être réglé après un changement d'arête de coupe, paramètres de coupe constants sur toute une série de pièces. Leur vitesse de coupe « moyenne et usuelle » est de 100 m/min pour les aciers courants. Il y a toujours intérêt à compléter les documents des fabricants de carbure pour avoir des « valeurs industrielles » (V_c pour une durée de vie de 15 minutes dans de l'acier XC48 peut en finition atteindre 300 m/min).

1.2.2.1 Les composants

Le carbure a une dureté presque équivalente à celle du diamant et conserve ses caractéristiques à une température voisine de 1000°C .

Le carbure métallique est un produit fabriqué selon les techniques de la métallurgie des poudres. Deux constituants principaux entrent dans la composition des carbures métalliques, les substances et les liants métalliques.

Ces deux composants sont broyés en une proportion déterminée dans des broyeurs à boulets. Après addition de lubrifiant la poudre soigneusement broyée est pressée et subit l'opération de pré-frittage. Les pièces ont alors une consistance crayeuse donc fragile, mais permettant à ce stade de la fabrication de les façonner sans difficulté.

Le produit pré-fritté subit alors une cuisson durant laquelle les carbures vont se lier de façon fine grâce au liant métallique. En effet seul ce dernier fond. On obtient alors le carbure final.

1.2.2.2 Les substances dures (phase α et phase γ)

Elles composent 70 à 90% du carbure, elles donnent la dureté et par suite la résistance à l'usure.

Elles se divisent en deux groupes appelés phases :

– phase α :

– WC : carbure de tungstène majoritairement (Température de fusion : 2600 °C)

– phase γ :

– TiC : carbure de titane (Température de fusion : 3169 °C)

– TaC : carbure de tantale (Température de fusion : 3760 °C)

– NbC : carbure de niobium (Température de fusion : 3500 °C)

1.2.2.3 Les substances liantes (phase β)

Elles représentent 10 à 30% de la composition du carbure. Elles donnent la ténacité du carbure.

La plus employée est le cobalt car il dissout facilement les différents carbures. Il existe également le nickel et le fer.

1.2.2.4 Détermination des nuances

La norme I.S.O. prévoit de classer les carbures en fonction du rapport substances liantes, substances dures. On obtient ainsi une classification en 3 lettres P, K, M, tenant compte de la dureté ou de la ténacité croissante.

Elle prévoit aussi une classification numérale pour compléter la classification littérale du type 01, 10,20, ..., 50, en fonction du domaine d'application.

Symbolé général	Grandes catégories de matières à usiner	Symbolé	Matières à usiner	Utilisation et conditions de travail
P	Métaux ferreux à copeaux longs	PO1	Acier, acier moulé	Tournage, alésage de finition : Vc élevée, petite section de copeaux. Précision dimensionnelle et qualité de surface. Travail sans vibrations.
		P10	Acier, acier moulé	Copage, filetage en tournage, fraisage : Vc élevée, petite ou moyenne section de copeaux.
		P20	Acier, acier moulé Fonte malléable à copeaux longs	Copage en tournage, fraisage : Vc et section de copeaux moyennes.
		P30	Acier, acier moulé Fonte malléable à copeaux longs	Tournage, fraisage : Vc petite ou moyenne, grande ou moyenne section de copeaux, conditions d'usinage défavorables.
		P40	Acier, acier moulé avec inclusion de sable ou retassures	Tournage : Vc petite, grande section de copeaux, possibilité de grand angle de coupe, conditions d'usinage défavorables sur machines automatiques.
		P50	Acier moulé : faible ou moyenne résistance avec inclusion de sable ou retassures	Opérations exigeant une bonne ténacité des carbures métalliques : tournage avec Vc petite et grande section de copeaux, possibilité de grand angle de coupe, conditions d'usinage défavorables.
M	Métaux ferreux à copeaux longs ou courts et métaux non ferreux	M10	Acier, acier moulé, acier au manganèse, fonte grise, fonte alliée	Tournage : Vc moyenne ou grande et section de copeaux moyenne.
		M20	Acier, acier moulé, acier austénitique, acier au manganèse, fonte grise	Tournage, fraisage : Vc et section de copeaux moyennes.
		M30	Acier, acier moulé, acier austénitique, fonte grise, alliage réfractaire	Tournage, fraisage : Vc moyenne et section de copeaux moyenne ou grande.
		M40	Acier de décolletage, acier de faible résistance. Métaux non ferreux et alliages légers	Tournage, tronçonnage, particulièrement sur machines automatiques.
K	Métaux ferreux à copeaux courts. Métaux non ferreux	K01	Fonte grise de dureté élevée, alliages légers à haute teneur en silicium, acier trempé, céramiques, matières plastiques abrasives	Tournage, tournage de finition, alésage, fraisage.
		K10	Fonte grise (>220 HB), fonte malléable à copeaux courts, acier trempé, alliages légers au silicium, alliages de cuivre, plastiques, verre, caoutchouc dur, porcelaine, pierre	Tournage, fraisage, perçage, alésage, brochage.
	Matières non métalliques	K20	Fonte grise (220 HB), métaux non ferreux	Tournage, fraisage, alésage, brochage exigeant une grande ténacité des carbures métalliques.
		K30	Fonte grise de faible dureté, acier de faible résistance, bois comprimé	Tournage, fraisage avec conditions d'usinage défavorables et possibilités de grand angle de coupe.
		K40	Bois naturel tendre ou dur et métaux non ferreux	Tournage, fraisage avec conditions d'usinage défavorables et possibilité de grand angle de coupe.

1.2.3 Les céramiques

Elles sont constituées de 90% d' Al_2O_3 (alumine) et de 10% d'oxyde métallique. Elles se révèlent surtout utiles pour des enlèvements importants de matière. Mais l'outil céramique supporte mal les variations importantes de copeau ce qui limite son utilisation pour des opérations de demi-finition où son action aura été préparée par un chanfrein d'entrée et un dégagement en fin d'usinage. La vitesse de coupe « standard » est de 500 m/min pour un acier courant.

1.2.4 Les outils revêtus

Pour bénéficier à la fois des qualités équivalentes à celles des céramiques sans en avoir les inconvénients, on fabrique des plaquettes en carbure métallique pouvant être, entre autres, revêtues de céramique, de nitrule de titane, etc.

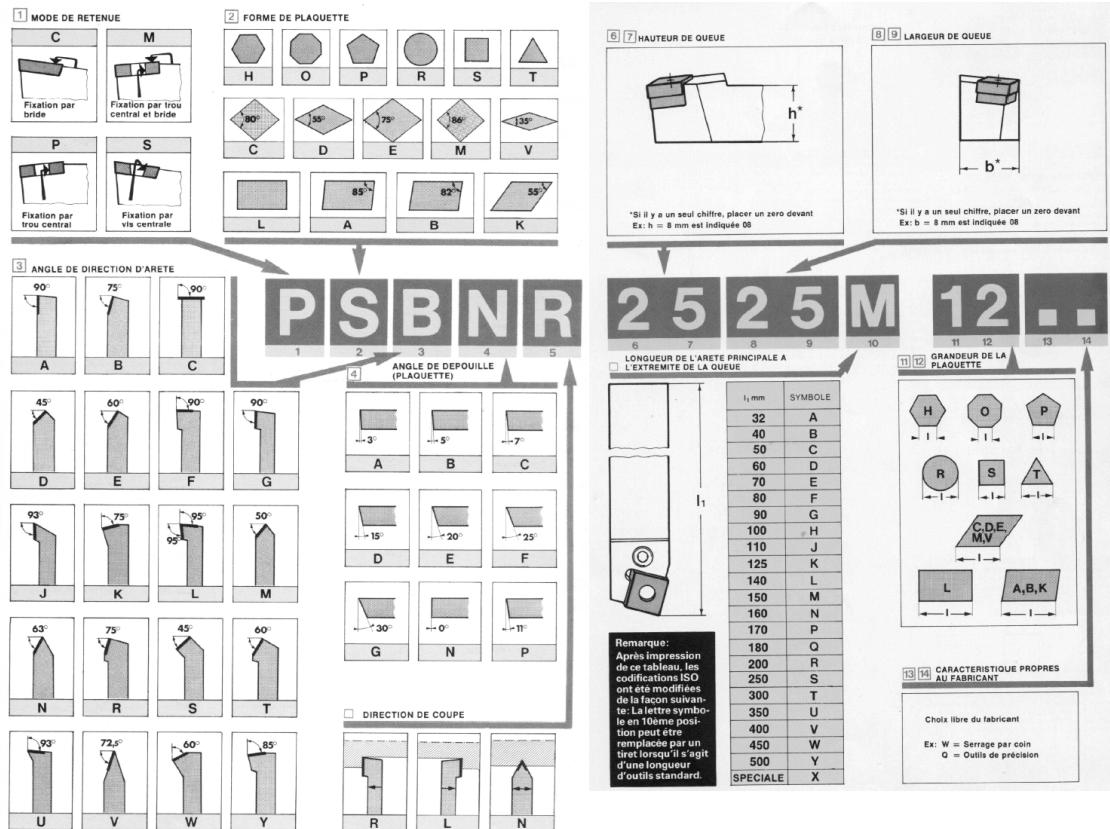
1.2.5 Les diamants

Réservés à la super finition, ils utilisent la grande dureté du carbone pur.

1.3 Désignation des plaquettes et des portes plaquettes

La désignation des portes plaquettes et des plaquettes fait l'objet d'une norme I.S.O. dont des éléments sont donnés ci-après.

1.3.1 Portes plaquettes



1.3.2 Plaquettes

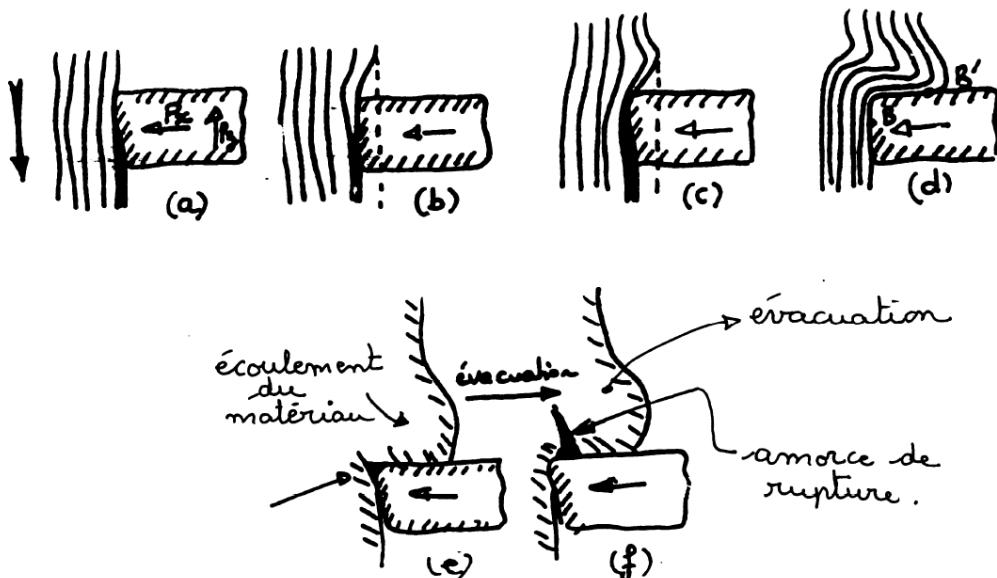
CODE ISO – Plaquettes amovibles											
1 FORME DE PLAQUETTE					2 ANGLE DE DEPOUILLE						
H	O	P	R	S	A	B	C	D	E		
L	A	B			G	N			K		
<i>d</i> : diamètre théorique du cercle inscrit à la plaque <i>s</i> : épaisseur de la plaque <i>m</i> : voir fig.											
	T	P	M	R	1	2	3	4			
3 TOLERANCES											
Lettre caract.	Tolérances en millimètres \pm			Tolérances en inches \pm							
A	± 0.005	± 0.025	± 0.025	± 0.0002	± 0.001	± 0.001					
F	± 0.005	± 0.025	± 0.013	± 0.0002	± 0.001	± 0.0005					
C	± 0.013	± 0.025	± 0.025	± 0.0005	± 0.001	± 0.001					
H	± 0.013	± 0.025	± 0.013	± 0.0005	± 0.001	± 0.0005					
E	± 0.025	± 0.025	± 0.025	± 0.001	± 0.001	± 0.001					
G	± 0.025	± 0.13	± 0.025	± 0.0010	± 0.005	± 0.001					
J	± 0.005	± 0.025	± 0.05	± 0.0002	± 0.001	± 0.002					
K	± 0.013	± 0.025	± 0.05	± 0.0005	± 0.001	± 0.002					
L	± 0.025	± 0.025	± 0.05	± 0.0010	± 0.005	± 0.002					
M	± 0.008	± 0.13	± 0.05	± 0.0003	± 0.007	± 0.008	± 0.002				
U	± 0.13	± 0.13	± 0.25	± 0.005	± 0.015	± 0.005	± 0.003				
1) Ces tolérances s'appliquent normalement aux plaquettes amovibles ayant des arêtes secondaires rectifiées (biseau plan). 2) La tolérance dépend de la forme de la plaque et doit être indiquée pour chaque plaquette, d'après les normes pour les dimensions correspondantes. Pour les plaquettes carrées et triangulaires (formes S et T), les tolérances de classes M et U sur m et d sont indiquées dans le tableau ci-après.											
T A S	Tolérance sur m \pm			Tolérance sur d \pm							
Diamètre du cercle inscrit mm	Classe M mm	Classe U mm	Classe M in	Classe M mm	Classe U mm	Classe U in					
6.35	± 0.250	± 0.08	± 0.003	± 0.13	± 0.005	± 0.005	± 0.002	± 0.08	± 0.003		
9.52	± 0.375	± 0.08	± 0.003	± 0.13	± 0.005	± 0.005	± 0.002	± 0.08	± 0.003		
12.7	± 0.500	± 0.13	± 0.006	± 0.20	± 0.008	± 0.008	± 0.003	± 0.13	± 0.005		
15.88	± 0.625	± 0.15	± 0.006	± 0.27	± 0.011	± 0.10	± 0.004	± 0.18	± 0.007		
19.05	± 0.750	± 0.15	± 0.006	± 0.27	± 0.011	± 0.10	± 0.004	± 0.18	± 0.007		
25.4	± 1.000	± 0.18	± 0.007	± 0.38	± 0.015	± 0.13	± 0.005	± 0.25	± 0.010		

CODE ISO – Plaquettes amovibles											
1 FORME DE PLAQUETTE					2 ANGLE DE DEPOUILLE						
H	O	P	R	S	A	B	C	D	E		
L	A	B			G	N			K		
<i>d</i> : diamètre théorique du cercle inscrit à la plaque <i>s</i> : épaisseur de la plaque <i>m</i> : voir fig.											
	T	P	M	R	1	2	3	4			
3 TOLERANCES											
Lettre caract.	Tolérances en millimètres \pm			Tolérances en inches \pm							
A	± 0.005	± 0.025	± 0.025	± 0.0002	± 0.001	± 0.001					
F	± 0.005	± 0.025	± 0.013	± 0.0002	± 0.001	± 0.0005					
C	± 0.013	± 0.025	± 0.025	± 0.0005	± 0.001	± 0.001					
H	± 0.013	± 0.025	± 0.013	± 0.0005	± 0.001	± 0.0005					
E	± 0.025	± 0.025	± 0.025	± 0.001	± 0.001	± 0.001					
G	± 0.025	± 0.13	± 0.025	± 0.0010	± 0.005	± 0.002					
J	± 0.005	± 0.025	± 0.05	± 0.0002	± 0.001	± 0.002					
K	± 0.013	± 0.025	± 0.05	± 0.0005	± 0.001	± 0.002					
L	± 0.025	± 0.025	± 0.05	± 0.0010	± 0.005	± 0.002					
M	± 0.008	± 0.13	± 0.05	± 0.0003	± 0.007	± 0.008	± 0.002				
U	± 0.13	± 0.13	± 0.25	± 0.005	± 0.015	± 0.005	± 0.003				
1) Ces tolérances s'appliquent normalement aux plaquettes amovibles ayant des arêtes secondaires rectifiées (biseau plan). 2) La tolérance dépend de la forme de la plaque et doit être indiquée pour chaque plaquette, d'après les normes pour les dimensions correspondantes. Pour les plaquettes carrées et triangulaires (formes S et T), les tolérances de classes M et U sur m et d sont indiquées dans le tableau ci-après.											
T A S	Tolérance sur m \pm			Tolérance sur d \pm							
Diamètre du cercle inscrit mm	Classe M mm	Classe U mm	Classe M in	Classe M mm	Classe U mm	Classe U in					
6.35	± 0.250	± 0.08	± 0.003	± 0.13	± 0.005	± 0.005	± 0.002	± 0.08	± 0.003		
9.52	± 0.375	± 0.08	± 0.003	± 0.13	± 0.005	± 0.005	± 0.002	± 0.08	± 0.003		
12.7	± 0.500	± 0.13	± 0.006	± 0.20	± 0.008	± 0.008	± 0.003	± 0.13	± 0.005		
15.88	± 0.625	± 0.15	± 0.006	± 0.27	± 0.011	± 0.10	± 0.004	± 0.18	± 0.007		
19.05	± 0.750	± 0.15	± 0.006	± 0.27	± 0.011	± 0.10	± 0.004	± 0.18	± 0.007		
25.4	± 1.000	± 0.18	± 0.007	± 0.38	± 0.015	± 0.13	± 0.005	± 0.25	± 0.010		

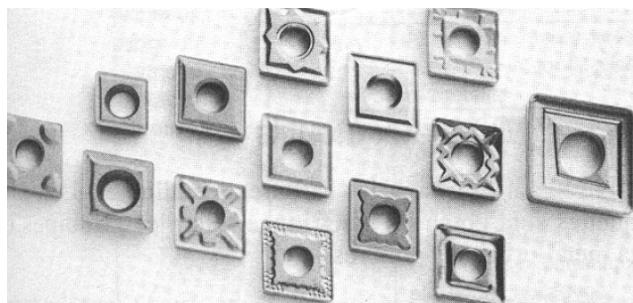
CODE ISO – Plaquettes amovibles									
1 FORME DE PLAQUETTE					2 ANGLE DE DEPOUILLE				
H	O	P	R	S	A	B	C	D	E
L	A	B			G	N			K
<i>d</i> : diamètre théorique du cercle inscrit à la plaque <i>s</i> : épaisseur de la plaque <i>m</i> : voir fig.									
	T	P	M	R	1	2	3	4	
3 TOLERANCES									
Lettre caract.	Tolérances en millimètres \pm			Tolérances en inches \pm					
A	± 0.005	± 0.025	± 0.025	± 0.0002	± 0.001	± 0.001			
F	± 0.005	± 0.025	± 0.013	± 0.0002	± 0.001	± 0.0005			
C	± 0.013	± 0.025	± 0.025	± 0.0005	± 0.001	± 0.001			
H	± 0.013	± 0.025	± 0.013	± 0.0005	± 0.001	± 0.0005			
E	± 0.025	± 0.025	± 0.025	± 0.001	± 0.001	± 0.001			
G	± 0.025	± 0.13	± 0.025	± 0.0010	± 0.005	± 0.002			
J	± 0.005	± 0.025	± 0.05	± 0.0002	± 0.001	± 0.002			
K	± 0.013	± 0.025	± 0.05	± 0.0005	± 0.001	± 0.002			
L	± 0.025	<							

2.2 Les mécanismes de l'usure

2.2.1 La formation du copeau (étude simplifiée)

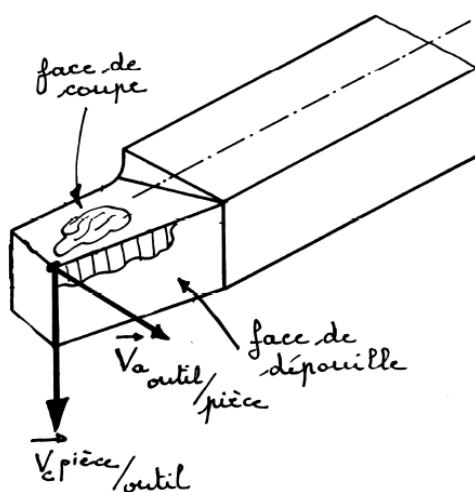


2.2.2 Notion de brise-copeau



Le déroulement continu du copeau est gênant : il faut le fractionner. C'est le rôle du brise-copeau qui est réalisé par aménagement des formes de la face de coupe.

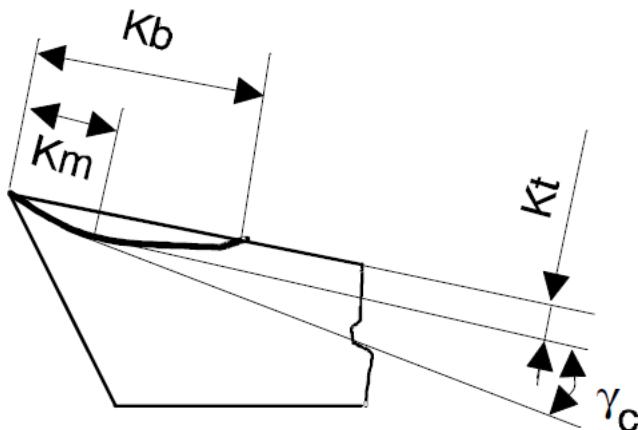
2.3 Les manifestations de l'usure



Suivant les conditions de coupe (vitesse de coupe, couple matériau – outil, couple matériau – pièce, vitesse d'avance, profondeur de passe, etc.), les manifestations de l'usure sont différentes et ont donc été répertoriées (et normalisées pour certaines) pour pouvoir procéder à des comparaisons.

2.3.1 L'usure en cratère Kt

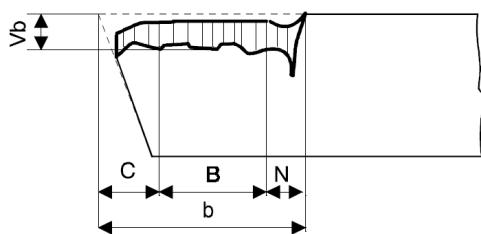
Elle apparaît pour les outils en carbure ou en céramique lors des travaux d'ébauche pour lesquels la pression de coupe est importante et la vitesse de coupe peu élevée, souvent pour des questions de puissance machine. Le copeau "appuie" sur la face de coupe en ménageant l'arête de coupe mais en « creusant » au-delà. Cela finit par entraîner «l'affaiblissement» de l'outil et sa destruction.



- Kb : largeur du cratère ;
- Km : distance du centre du cratère ;
- Kt : profondeur du cratère ;
- γ_c : angle de cratérisation.

2.3.2 L'usure en dépouille Vb

Elle apparaît pour des vitesses de coupe importantes dans le cadre de travaux de finition. Elle est due au frottement pièce outil et, provoquant le recul du point ou de l'arête générant la surface, change le dimensionnement de la pièce ainsi réalisée. D'autre part les angles de coupe n'étant plus respectés il y a détérioration de l'état de surface.



- Zone C : partie pointe de l'outil partie courbe de l'arête
- Zone N : 1/4 de la zone b
- Zone B : partie restante
- Vb est mesurée dans la zone B, on retient la largeur moyenne de cette bande si elle est régulière ; sinon on prend la valeur maxi.

2.3.3 Autres types d'usure

Usure par effondrement d'arête : dans le cas des outils en acier rapide se produit quand la vitesse de coupe est trop importante. La température provoque l'effondrement des caractéristiques de l'outil.

Usure en entaille : quand une pièce présente une dureté superficielle l'outil va s'user préférentiellement à cet endroit alors que la pointe de l'outil sera préservée.

Usure par fissuration : elle se manifeste sur les outils ayant subi des chocs thermiques (problèmes de lubrification) ou des chocs mécaniques (travaux de fraisage). L'arête de l'outil présente alors des fissures perpendiculaires à cette dernière.

2.4 Informations sur les lois expérimentales d'usure

2.4.1 Évolution de l'usure en fonction du temps

Il paraît évident que connaître l'évolution de l'usure est indispensable dans le cadre de la maîtrise des coûts et de la productivité.

La durée de vie d'un outil, c'est à dire l'usure qu'il peut supporter avant d'être considéré comme impropre à la fabrication est liée principalement à la vitesse de coupe. Les toutes premières lois d'usure visent à établir cette corrélation.

Puis pour affiner les résultats des modèles faisant intervenir l'avance et la profondeur de passe sont intervenus. La difficulté vient alors des campagnes de mesure qu'il faut mettre en œuvre pour paramétriser ces modèles. On préfère encore un modèle simple et moins précis mais exploitable et financièrement moins gourmand lors de sa mise en œuvre.

Les aciers rapides se prêtent mal à ce type d'essais car il y a souvent phénomène d'arête rapportée et hétérogénéité due aux conditions d'affûtage (l'affûtage produit des modifications de dureté locale).

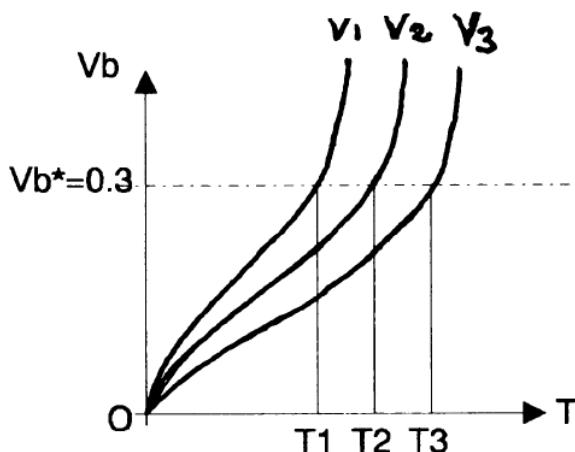
Un modèle mathématique très simplifié permet d'avoir une idée de l'évolution de l'usure. C'est le modèle de Taylor.

$$T = C_v V^n$$

Cette loi lie l'usure à la vitesse de coupe. Elle n'est pas valable pour les valeurs extrêmes de la "droite de Taylor".

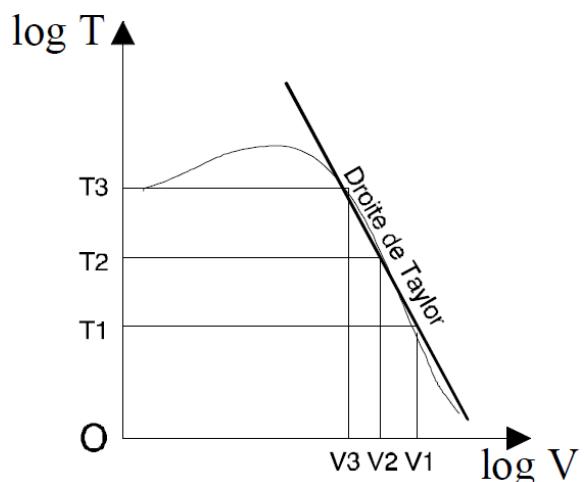
2.4.2 Construction de la droite de Taylor

On effectue le tracé des courbes d'usure en fonction du temps d'usinage, et cela pour une gamme de vitesses de coupe.



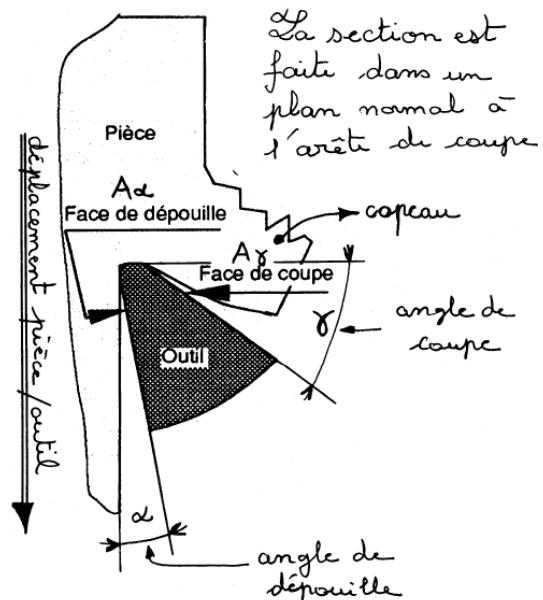
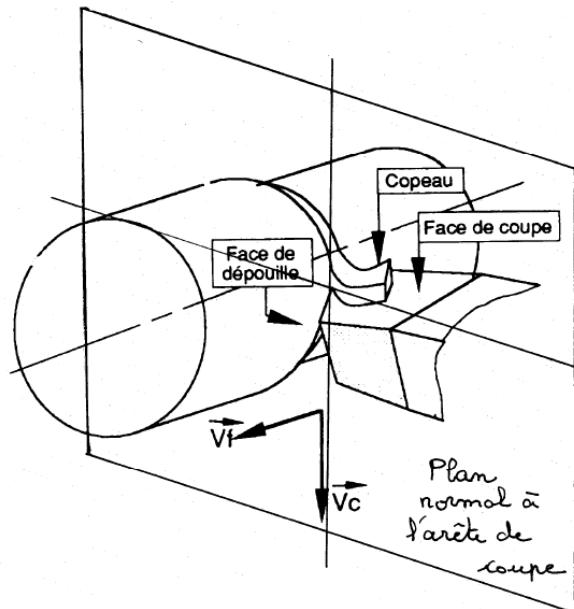
On constate qu'une partie des points est pratiquement alignée sur une droite de pente n , n coefficient de la droite d'usure de Taylor.

On choisit un critère d'usure et on obtient des couples (V_i, T_i) de valeurs que l'on reporte sur un graphe en coordonnées logarithmiques.



3 La géométrie des outils

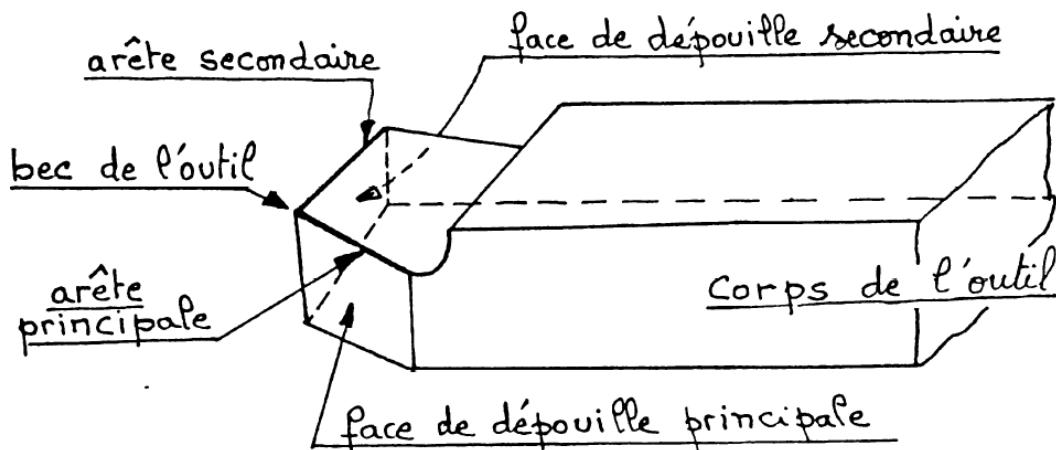
3.1 Généralités



Dans la théorie sur la formation du copeau et dans le cadre de la coupe orthogonale, il faut noter l'importance des angles de la face d'attaque γ et de la face de déboulle α . Ces angles sont définis dans un plan perpendiculaire à l'arête de coupe, ce plan permettant la mise en place d'un système d'axes lié à la direction de la vitesse de coupe :

- α est l'angle de déboulle ;
- γ est l'angle de coupe ;
- β est l'angle de taillant ;
- relation permanente $\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ$.

Dans la pratique la coupe orthogonale n'est qu'un cas particulier. Le plus souvent, l'arête de coupe n'est pas perpendiculaire à la direction de la vitesse de coupe et une deuxième arête appelée arête secondaire est nécessaire pour détacher le copeau de la surface engendrée. L'arête secondaire est l'intersection de la face de coupe et de la face de déboulle secondaire.



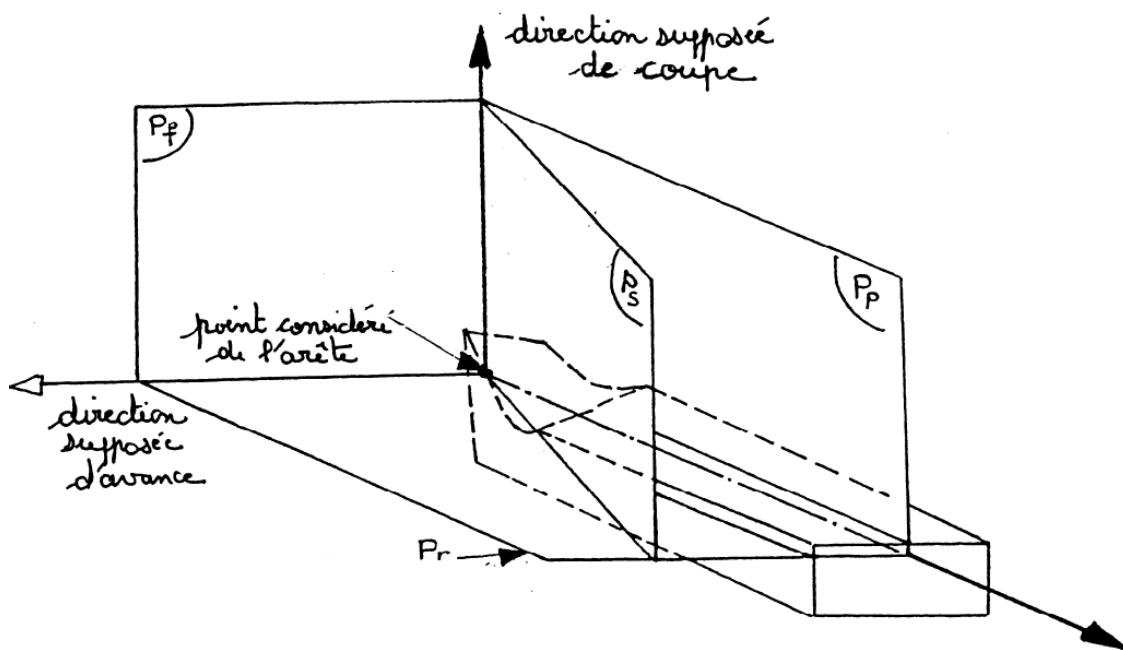
3.2 Les plans de l'outil

3.2.1 Introduction

Au départ aucun référentiel n'est associé à un outil. Pour des raisons pratiques trois référentiels ont été choisis correspondant aux trois situations de l'outil :

- plans de l'outil en main - permettent de paramétriser l'outil quand il est dans un magasin ou sur un catalogue
- plans de l'outil en travail - les plans sont construits par rapport à la cinématique de la coupe (Vitesse de coupe et Vitesse d'avance)
- plans liés à la machine où se réalise l'affûtage (non traités ici)

3.2.2 Plans de l'outil en main



3.2.2.1 Plan de référence de l'outil P_r

Plan passant par le point considéré de l'arête et contenant l'axe de l'outil (pour un outil tournant) ou parallèle au plan de base servant de face d'appui au corps d'outil (pour un outil classique de tournage ou de rabotage).

Plus généralement, plan perpendiculaire à la direction supposée de coupe de l'outil, c'est-à-dire à celle des trois directions principales du corps d'outil qui, dans les conditions normales d'utilisation, serait la plus proche de la direction de coupe.

3.2.2.2 Plan d'arête de l'outil P_s

Plan tangent à l'arête, au point considéré, et perpendiculaire au plan de référence de l'outil P_r .

3.2.2.3 Plan de travail conventionnel P_f

Plan perpendiculaire au plan de référence de l'outil P_r , au point considéré de l'arête, et parallèle à la direction supposée d'avance de l'outil, c'est-à-dire à celle des trois directions principales du corps d'outil qui, dans les conditions normales d'utilisation, serait la plus proche de la direction d'avance.

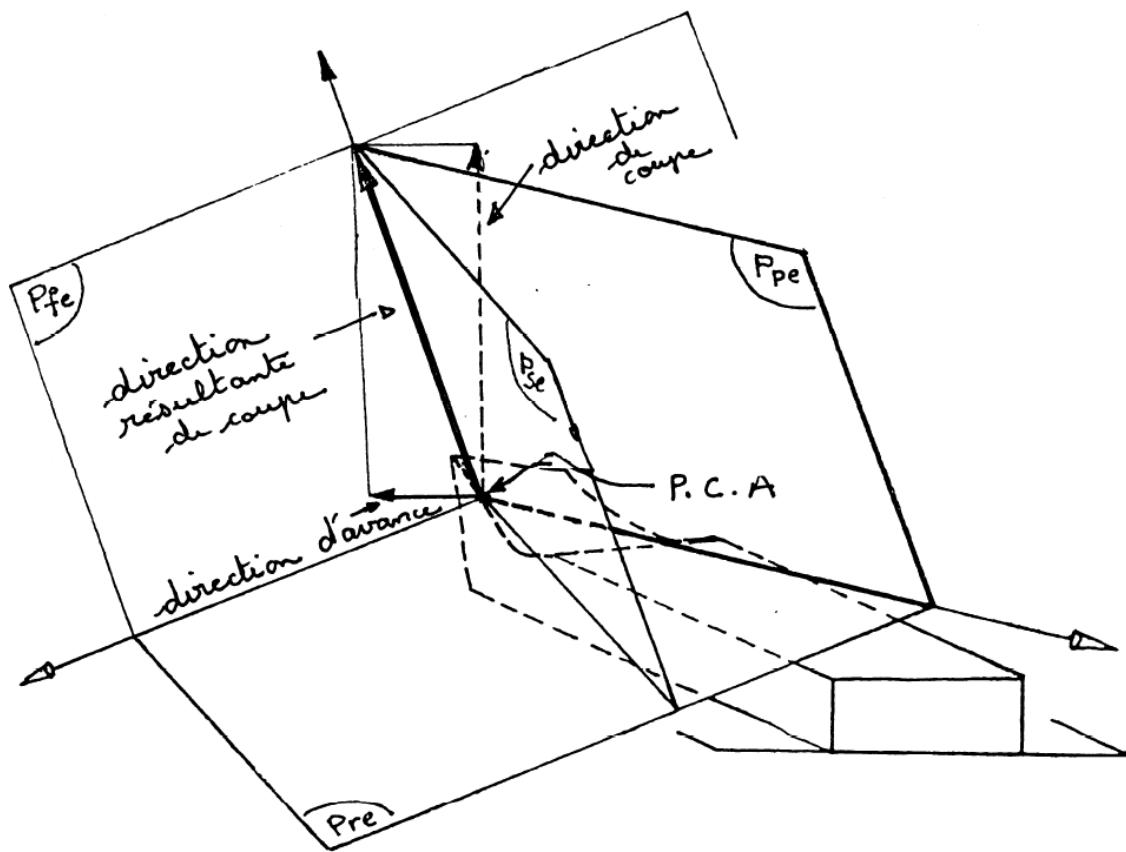
Pour un outil tournant, c'est un plan parallèle ou perpendiculaire à l'axe de l'outil, suivant que la direction d'avance est elle-même parallèle ou perpendiculaire à l'axe.

Pour un outil de tour classique, c'est un plan perpendiculaire ou parallèle à la direction de la queue, suivant que la direction d'avance est parallèle ou perpendiculaire à l'axe du tour.

3.2.2.4 Plan vers l'arrière de l'outil P_p

Plan perpendiculaire au plan de référence de l'outil P_r , et au plan de travail conventionnel P_f , au point considéré de l'arête.

3.2.3 Plans de l'outil en travail



3.2.3.1 Plan de référence en travail P_{re}

Plan perpendiculaire, au point considéré de l'arête, à la direction résultante de coupe, c'est-à-dire à la direction instantanée du mouvement résultant du mouvement de coupe et du mouvement d'avance simultanés en ce point.

3.2.3.2 Plan d'arête en travail P_{se}

Plan tangent à l'arête, au point considéré, et perpendiculaire au plan de référence en travail P_{re} . Ce plan contient la direction résultante de coupe.

3.2.3.3 Plan de travail P_{fe}

Plan contenant la direction de coupe et la direction d'avance au point considéré de l'arête. Ce plan est perpendiculaire au plan de référence en travail P_{re} .

3.2.3.4 Plan vers l'arrière en travail P_{pe}

Plan perpendiculaire au plan de référence en travail P_{re} et au plan de travail P_{fe} , au point considéré de l'arête.

3.2.4 Autres plans

3.2.4.1 Plan orthogonal P_o

P_o plan orthogonal, perpendiculaire au plan de référence P_r et au plan d'arête P_s .

3.2.4.2 Plan normal

P_n plan normal, plan perpendiculaire à l'arête au point considéré.

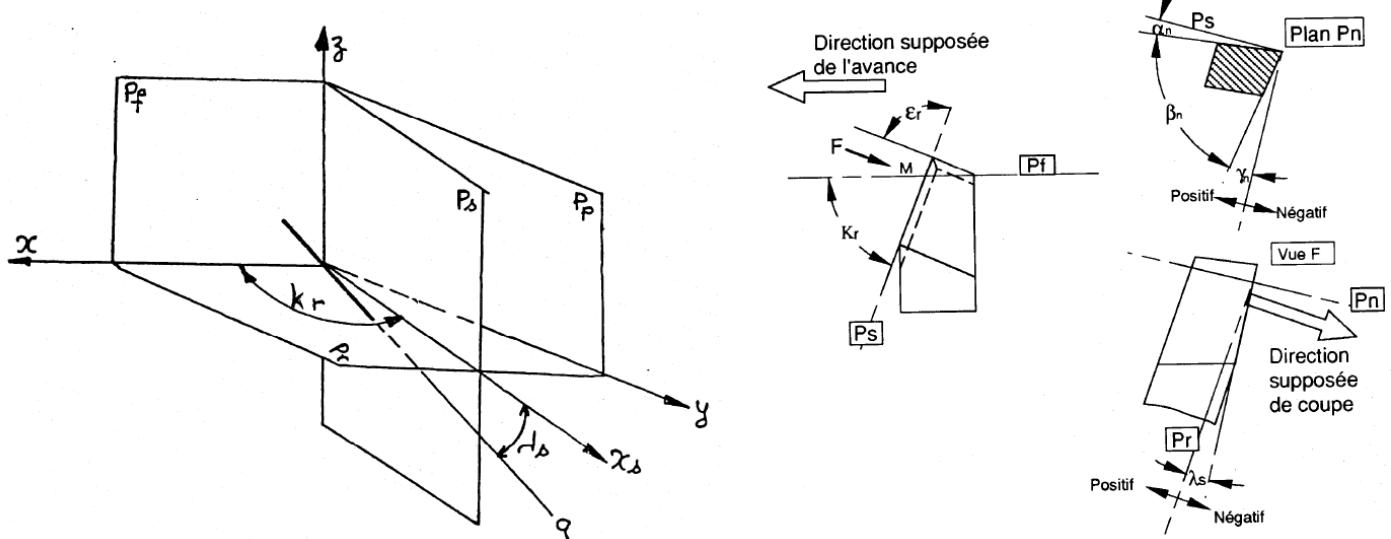
3.3 Définition des angles

3.3.1 Angles entre ces plans

Deux angles sont nécessaires et suffisants pour définir une direction. Cette direction sera celle d'une arête ou celle d'une normale à un plan de l'outil.

L'arête est positionnée par deux angles aigus :

- l'angle de direction d'arête κ entre P_f et P_s : l'indice est r pour le repère en main, re pour le repère en travail est toujours positif. Cet angle assure une entrée progressive de l'outil dans la matière à usiner si $\kappa_r < 90^\circ$. Par contre trop petit augmente la longueur de l'arête et cela influe sur les efforts de coupe ;
- l'angle d'inclinaison λ d'arête entre x_s et a : même remarque pour les indices. λ est positif dans le sens si la direction d'arête dessous le plan P_r . Un angle négatif augmente la robustesse de l'arête et provoque la fragmentation des copeaux. Un angle positif donne une meilleure acuité d'arête et diminue le copeau minimum ;
- l'angle de pointe ε_R mesuré dans P_r entre P_s et le plan perpendiculaire à P_r et contenant l'arête de dépouille secondaire.



3.3.2 Les angles α , β et γ dans ces plans

Ces angles ont leur projection dans n'importe quel plan défini précédemment. Il suffit de mettre l'indice correspondant avec e pour l'outil en travail. Il faut noter deux plans importants :

- P_0 plan orthogonal permet de définir les angles orthogonaux α_0 , β_0 et γ_0 ;
- P_n plan normal permet de définir les angles normaux α_n , β_n et γ_n .

Le fait de rajouter un indice e précise que l'on est dans le repère de l'outil en travail.

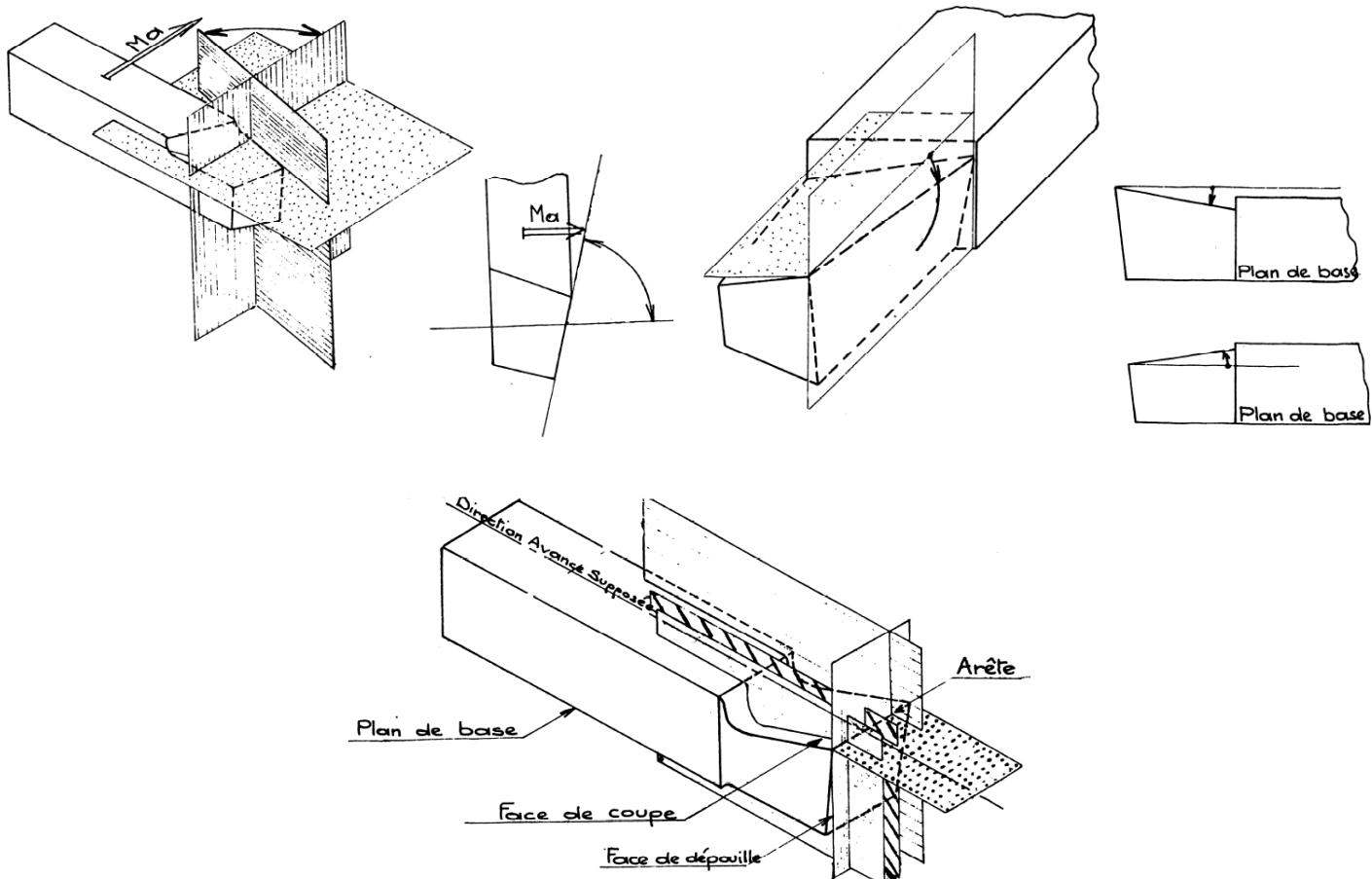
Si l'angle de dépouille α est grand l'outil est fragilisé, s'il est petit on augmente les risques de talonnage. Valeur courante 3 à 5 degrés.

Si l'angle de coupe γ est négatif (cas des outils en carbure) la tenue aux efforts est améliorée. S'il est positif et grand le copeau s'écoule facilement mais l'outil est fragilisé.

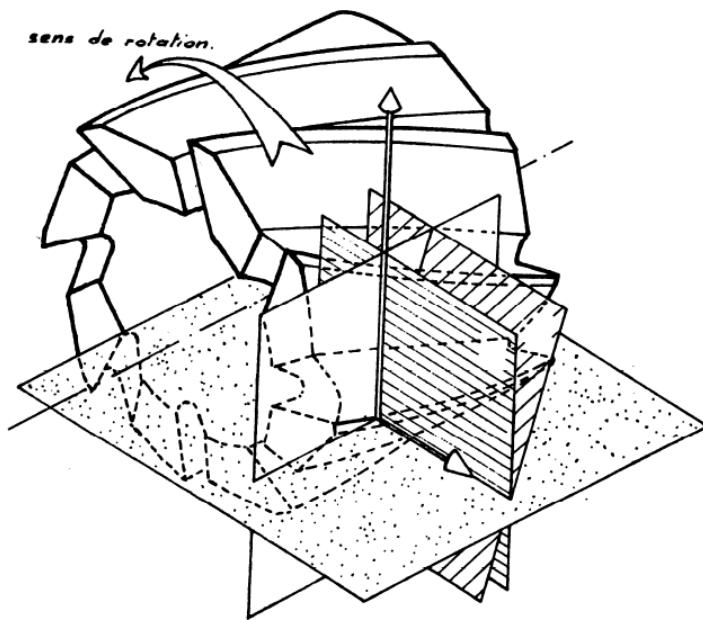
4 Étude de géométries courantes d'outil

Sur les vues suivantes précisez les divers angles et plans.

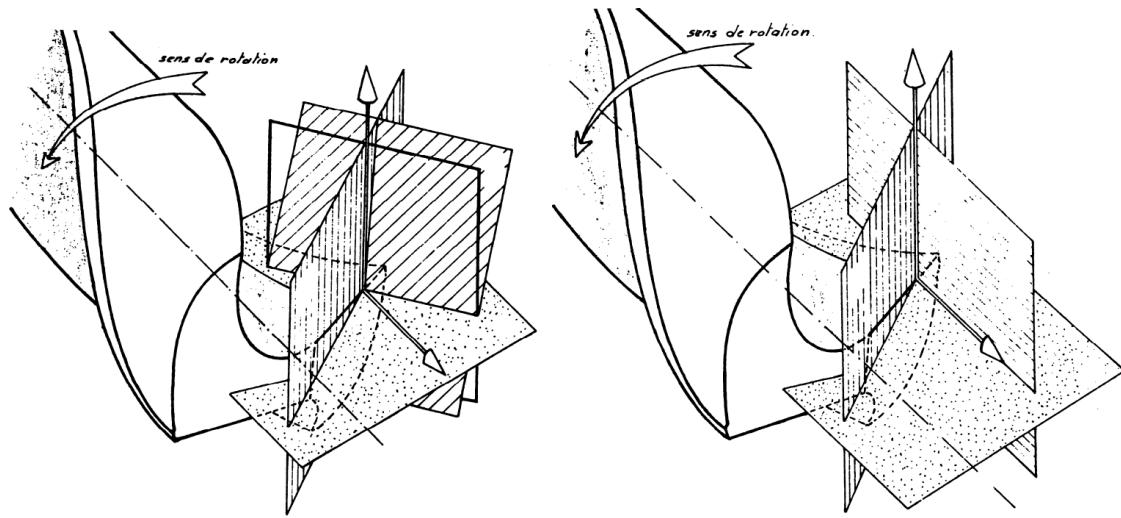
4.1 Cas du tournage



4.2 Cas du fraisage



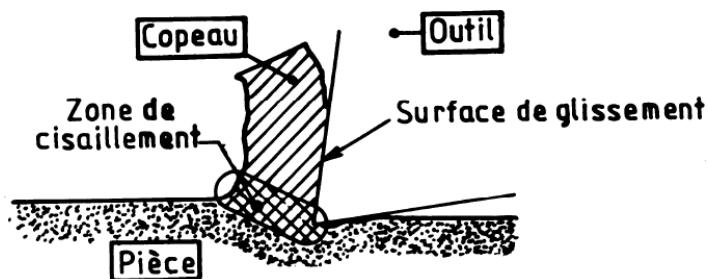
4.3 Cas du perçage



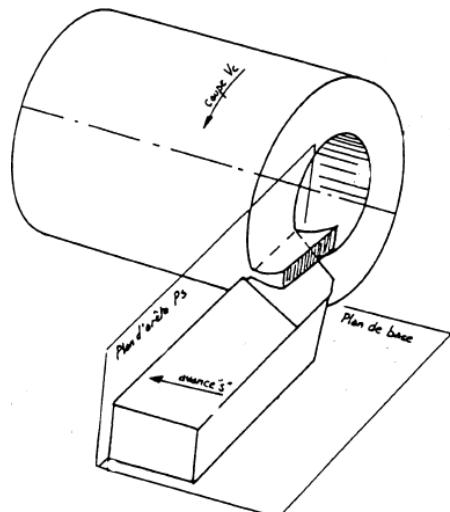
5 Efforts et puissance de coupe

5.1 Théorie de Merchant

Dans l'étude du copeau à l'aide des essais de coupe interrompu, l'attention s'est portée sur une zone particulière appelée zone de cisaillement.

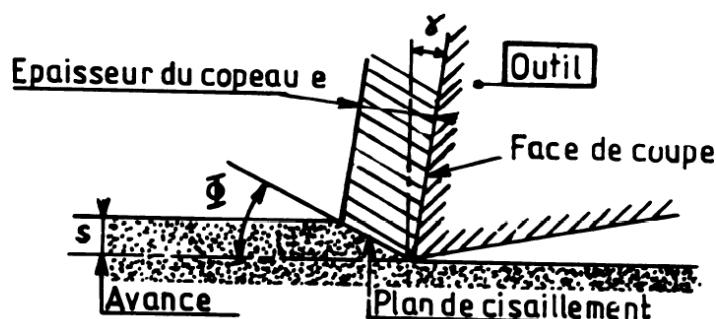


Les essais se font toujours dans le cadre de la coupe orthogonale : les problèmes liés à la pointe de l'outil sont évacués. D'autre part il est facile de définir une section de copeau constante dans un plan défini uniquement par la vitesse d'avance et la vitesse de coupe.



Il est alors possible de faire les hypothèses suivantes :

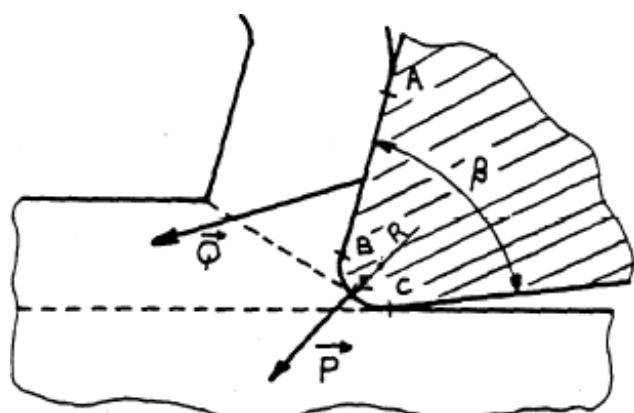
- le métal est homogène et isotrope
- la coupe est orthogonale (le phénomène est identique dans tous les plans perpendiculaires à l'arête de coupe)
- le rayon de bec de l'outil est nul (raccordement parfait entre surfaces de coupe et surface de dépouille)
- il n'y a pas de zone morte
- la profondeur de passe est grande devant la taille des cristaux.



Le calcul non traité ici se mettrait en place de la façon suivante :

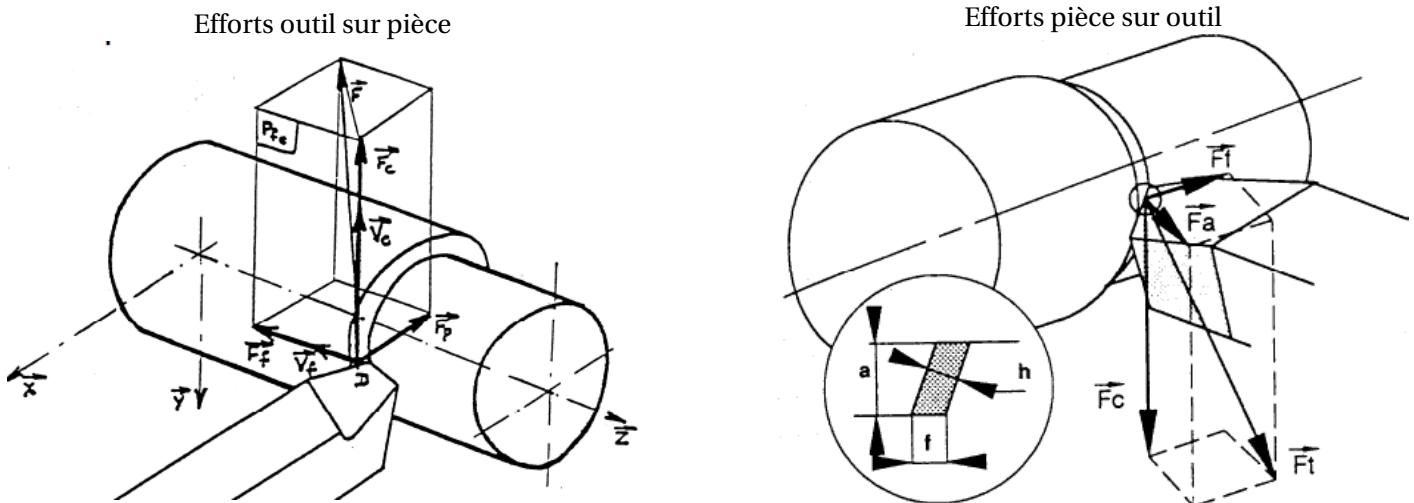
- le copeau glisse sur la face de coupe - forces de frottement ;
- dans le plan de cisaillement il y a rupture ce qui entraîne une contrainte tangentielle au plan de cisaillement ;
- épaisseur du copeau après coupe (e) > épaisseur du copeau après coupe (s) entraîne une compression créant une contrainte normale au plan de cisaillement.

5.2 La théorie d'Albrecht



Une des hypothèses pose problème, c'est celle concernant le rayon nul. Pour Albrecht la prise en compte du rayon permet la mise en évidence d'un refoulement qui va augmenter les efforts de coupe mis en jeu.

5.3 Modèle pratique - mise en place des efforts



Ces efforts sont repérés par la norme NF E 66-507 et ISO 3002/4 :

- \vec{F}_p : force transversale, composante de la force totale perpendiculaire au plan de travail P_{fe} ;
- \vec{F}_c : force de coupe, composante de la force totale obtenue par projection sur la direction de coupe définie par le vecteur \vec{V}_c ;
- \vec{F}_f : force d'avance, composante de la force totale obtenue par projection sur la direction d'avance.

En général on considère que :

- $0,3F_c < F_f < 0,6F_c$;
- $0,1F_c < F_p < 0,4F_c$.

6 Puissance de coupe

La puissance nécessaire à l'opération de coupe s'exprime donc par le comoment du torseur des actions mécaniques et du torseur cinématique.

Le torseur des actions mécaniques est donné par :

$$\{\mathcal{T}(\text{outil} \rightarrow \text{piece})\} = \begin{Bmatrix} -F_p & 0 \\ -F_c & 0 \\ -F_f & 0 \end{Bmatrix}_D$$

Le torseur cinématique est le suivant :

$$\{\mathcal{V}(\text{outil/piece})\} = \begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & V_c \\ \omega & V_f \end{Bmatrix}_D$$

On arrive donc à la relation suivante :

$$\mathcal{P} = V_c \cdot F_c + V_f \cdot F_f$$

somme d'une puissance liée à la coupe et d'une puissance liée à l'avance.

Comme la puissance d'avance est 100 fois plus petite que la puissance de coupe il y assimilation entre puissance totale et puissance de coupe :

$$\mathcal{P} = V_c \cdot F_c$$

Pression spécifique de coupe

Elle est définie principalement comme le rapport entre la force de coupe et la section du copeau. Il existe des tableaux permettant de la connaître en fonction de différents paramètres dont l'un, fondamental est le matériau usiné. Elle s'exprime en dAN/mm^2 ou en Mpa . Les fabricants d'outils proposent de tels tableaux. Ils peuvent aussi se présenter sous forme d'abaque.

On peut donc écrire que :

$$F_C = K_S \cdot a \cdot f \quad \text{et que} \quad \mathcal{P} = F_c \cdot V_c$$

6.1 Influence des différents paramètres sur l'effort de coupe

6.1.1 Les paramètres premiers

6.1.1.1 Influence de la vitesse de coupe

La vitesse de coupe n'a pas d'influence sur l'effort de coupe hormis aux basses vitesses où l'apparition du copeau adhérent entraîne une augmentation. Cela peut expliquer les phénomènes de vibration ou de bruits apparaissant en fin de dressage. Mais attention avec les outils carbure la température au niveau de la zone de formation du copeau devient importante et tend à faire diminuer K_s .

6.1.1.2 Influence de la profondeur de passe

L'effort de coupe croît avec la profondeur de passe de façon linéaire.

6.1.1.3 Influence de l'avance

L'effort de coupe croît avec l'avance mais de façon non linéaire. En effet elle diminue proportionnellement à son augmentation (légèrement!).

6.1.1.4 Conclusions

Le modèle $\mathcal{P} = K_s \cdot s \cdot a \cdot V_c$ ne peut s'appliquer que si on module K_s . Des abaques ou les tableaux font intervenir ces différences. Il n'y a pas un K_s unique !

6.1.2 Les autres paramètres

Il faudra donc également étudier l'influence de :

- matériau outil (peu d'influence) ;
- état d'usure de la partie active (difficile à évaluer) ;
- la lubrification (difficile à évaluer). La lubrification sert principalement à baisser la température à la pointe de l'outil.

Il existe un modèle pour prendre en compte la géométrie de l'outil. C'est le modèle suivant :

$$K_s = C \cdot (f \cdot \sin \kappa_r)^n \cdot (1 + m\gamma)$$

- f est l'avance en mm par tour ;
- C est lié au matériau, c'est une pression spécifique de coupe ;
- n est un coefficient permettant d'intégrer le rôle de κ_r . Il vaut -0,2 pour l'acier, -0,3 pour la fonte, -0,5 pour les matériaux non ferreux ;
- γ permet de tenir compte des variations d'angles de coupe. On prendra $m = 0,08$ pour les aciers et $m = 0,01$ pour les fontes et métaux non ferreux.

6.2 Puissance réellement consommée

Il ne faut pas oublier que la puissance utilisée par l'outil est passée « au travers » de tout un ensemble électromécanique qui a un rendement. Il est admis pour une machine un rendement de 0,7 à 0,8.