



Usinage à grande vitesse *UGV*

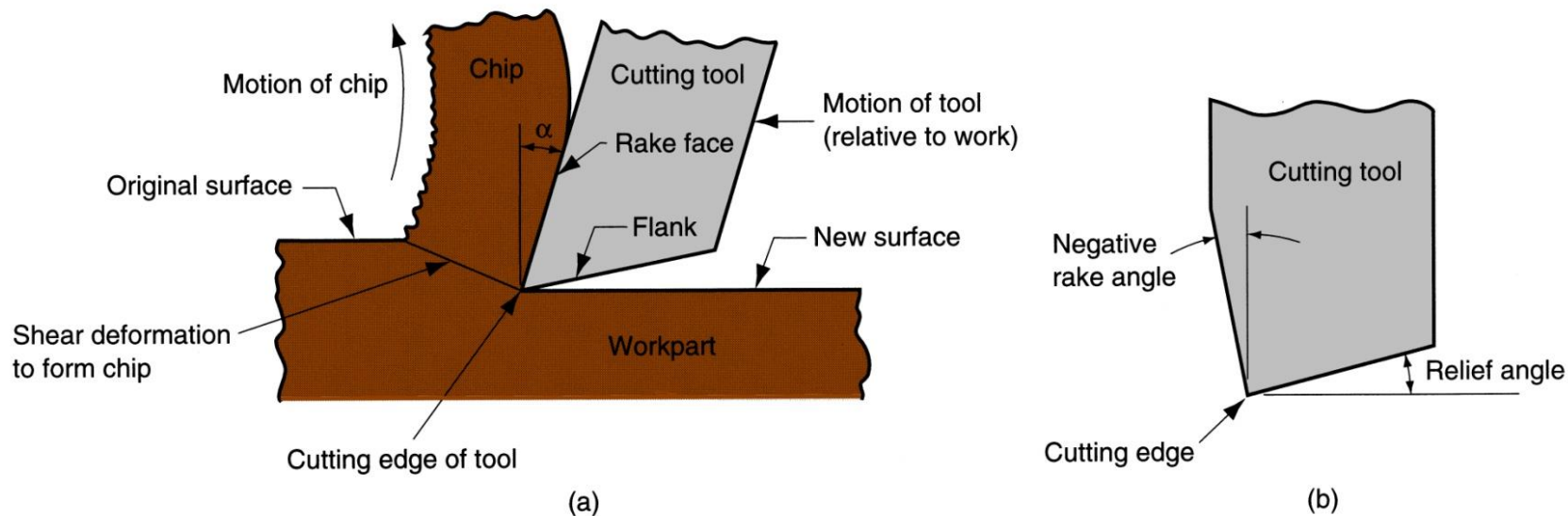
Master II Fabrication mécanique et productique

Par Dr. Slamani Mohamed

UGV

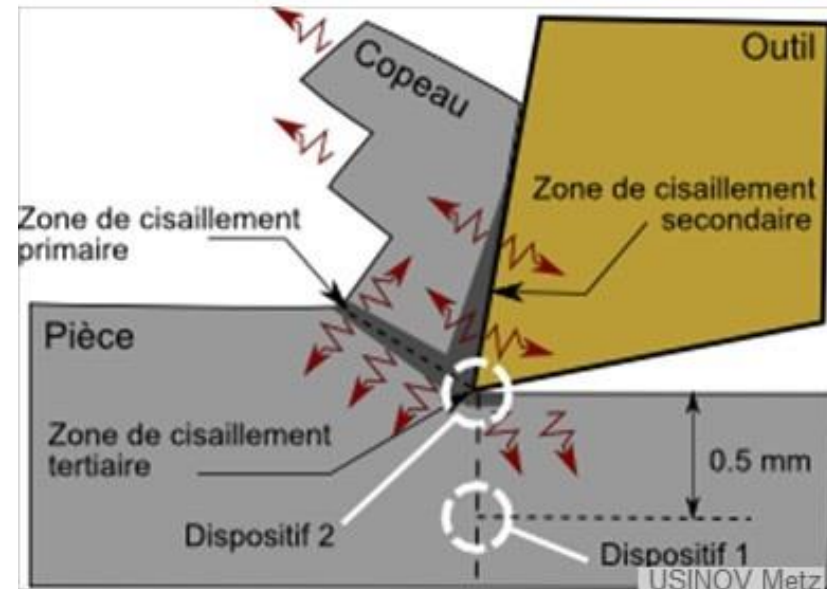
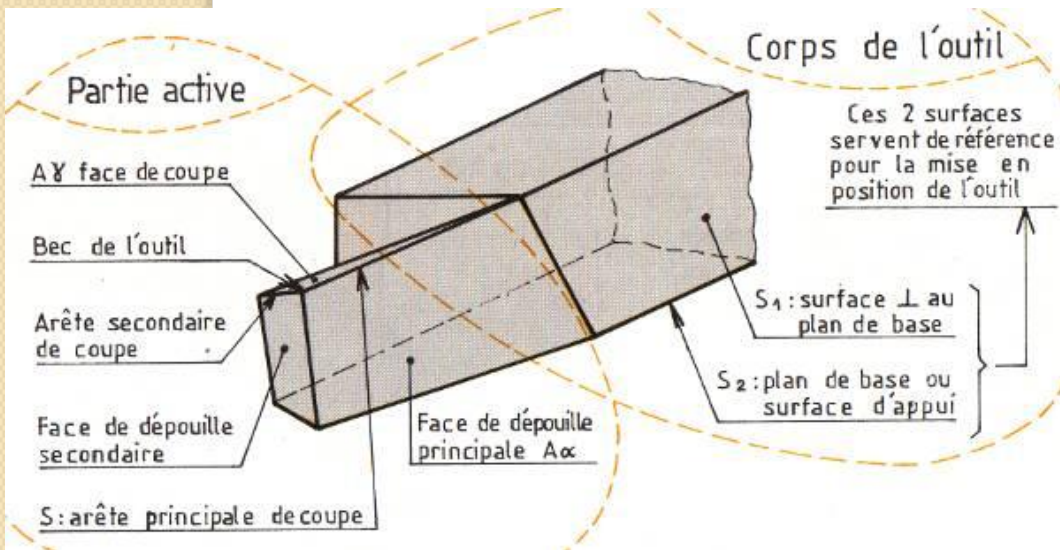
La formation du copeau en coupe orthogonale

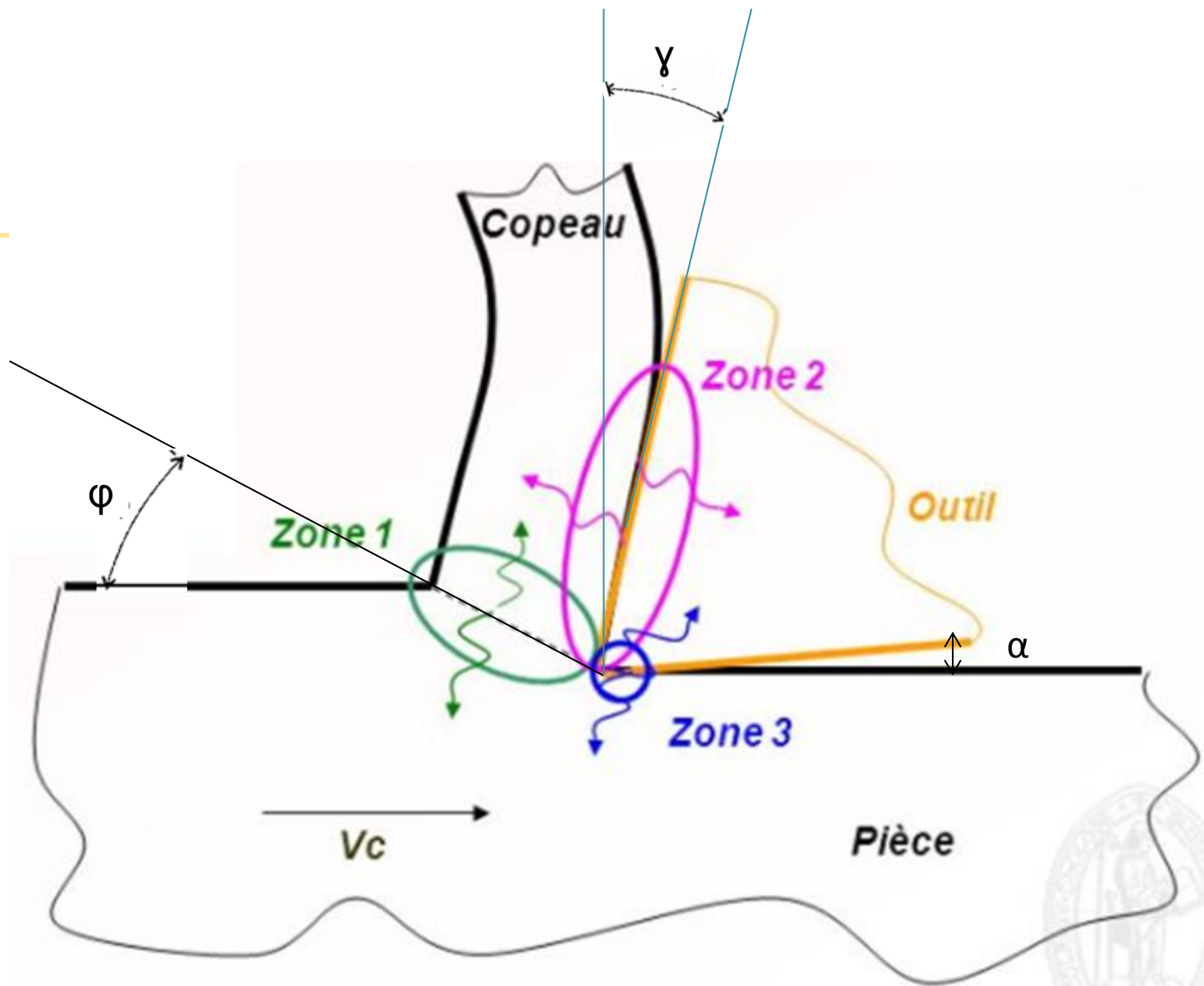
Quand l'outil entre en contact avec la couche superficielle de la pièce, l'avance de celui-ci provoque une forte compression de la matière et génère un cisaillement intense entre la pointe de l'outil et la surface de la pièce, Merchant (1945).



Définition des zones de cisaillement

Cette zone de formation du copeau est appelée zone de cisaillement primaire et s'étend de l'arête de coupe à la surface externe du copeau. Celui-ci ainsi formé frotte sur la face de coupe de l'outil; cette zone de frottement entre l'outil et le copeau est appelée zone de cisaillement secondaire, Pomey (1971). Une troisième zone que l'on nomme zone tertiaire de cisaillement est le résultat du frottement entre la surface usinée et la face en dépouille de l'outil.

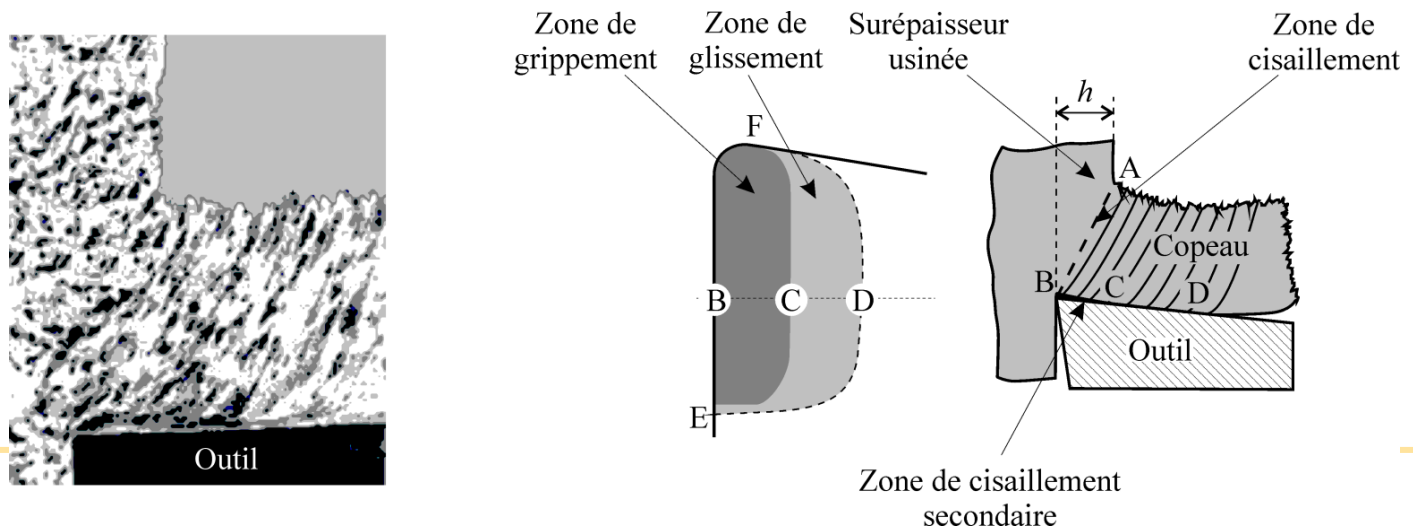




Formation du copeau

On appelle la zone de coupe l'endroit où la surépaisseur d'usinage se transforme en copeau. Dans cette zone, l'état des contraintes et des déformations du matériau usiné est très complexe et il dépend des conditions de coupe. Le métal est comprimé lorsqu'il s'approche de la zone de cisaillement de l'outil et devient plastique après avoir dépassé la limite d'élasticité

Dans la zone de coupe, le copeau s'écoule partiellement le long de la face coupante et partiellement vers le haut jusqu'à ce qu'il se forme un plan de cisaillement.



■ ZONES en coupe orthogonale

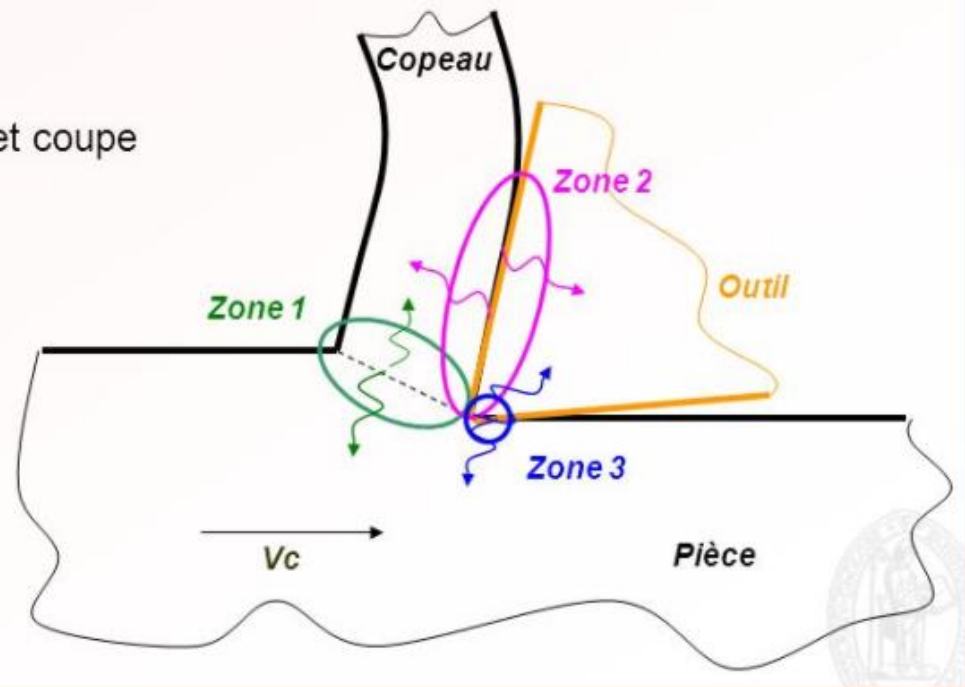
- Cisaillement primaire (*Zone 1*) : zone de création du copeau
- Zone secondaire (*Zone 2*) : frottement interface outil copeau (*effet négligé*)
- Zone tertiaire (*Zone 3*) : frottement interface outil pièce

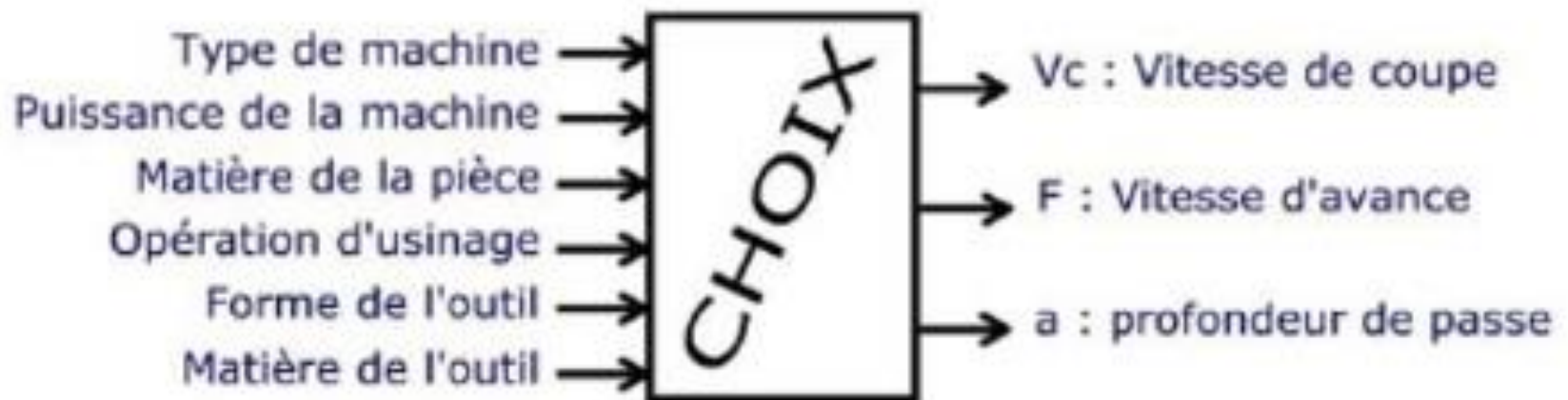
■ Paramètres de coupe

- V_c , a_p , f , angles d'outils et coupe
- Rayon d'arête
- Usure (dépouille)

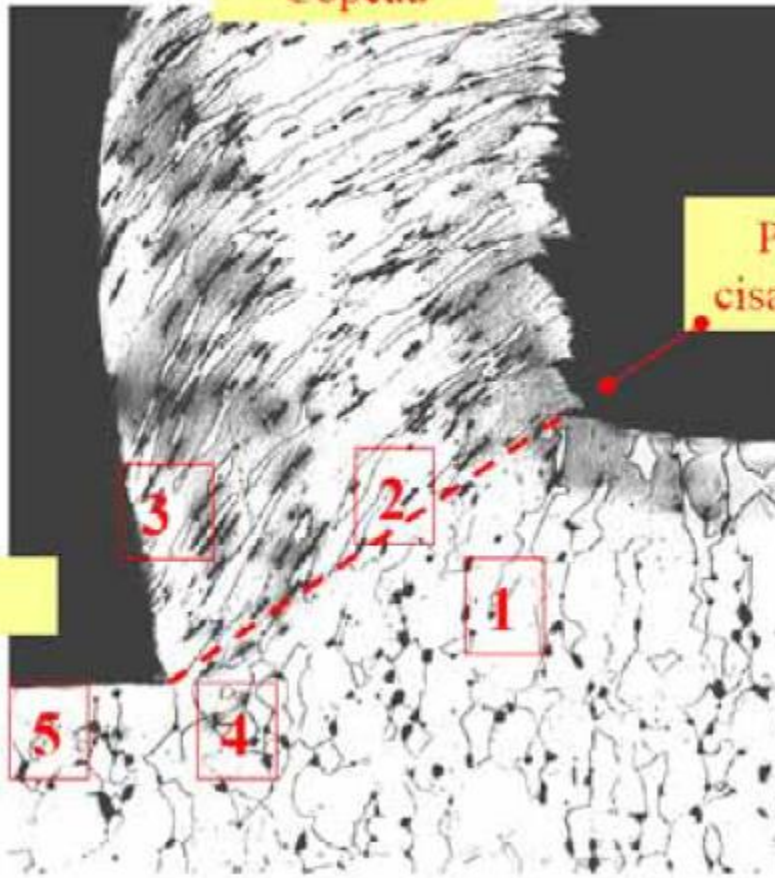
■ Matériau outil – pièce

- R_e , E
- Conductivité
- Diffusivité thermique



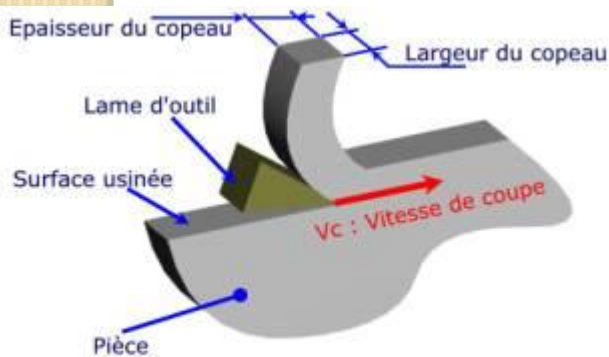


Copeau



Plan de cisaillement

Outil



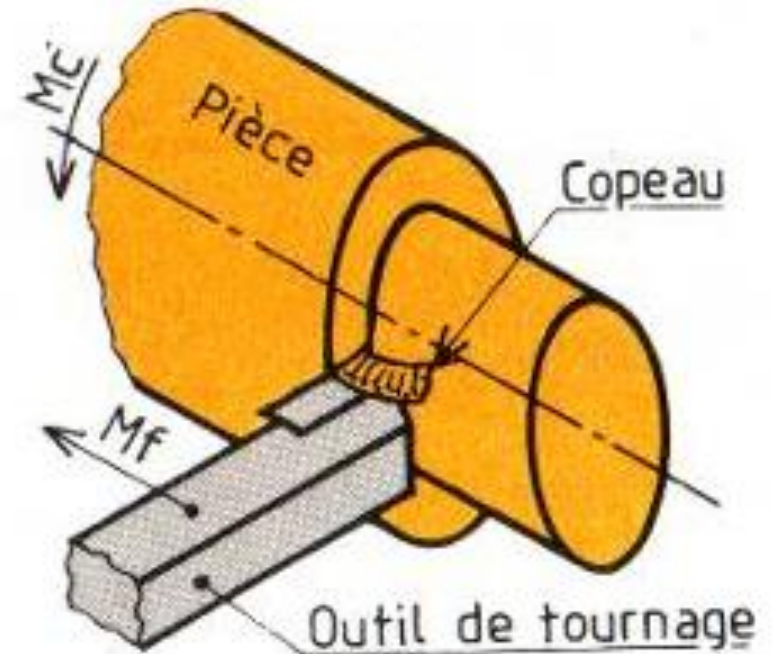
1 - zone de déformation avancée

2 - surface de cisaillement.

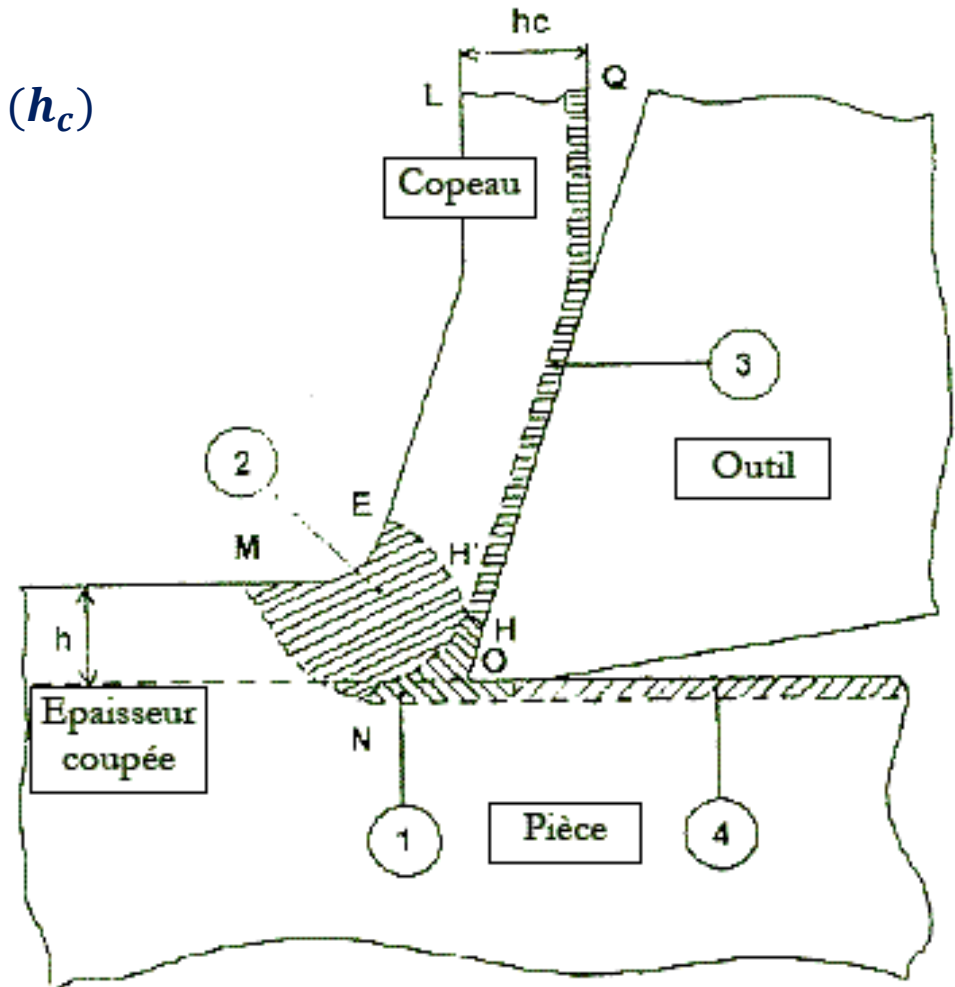
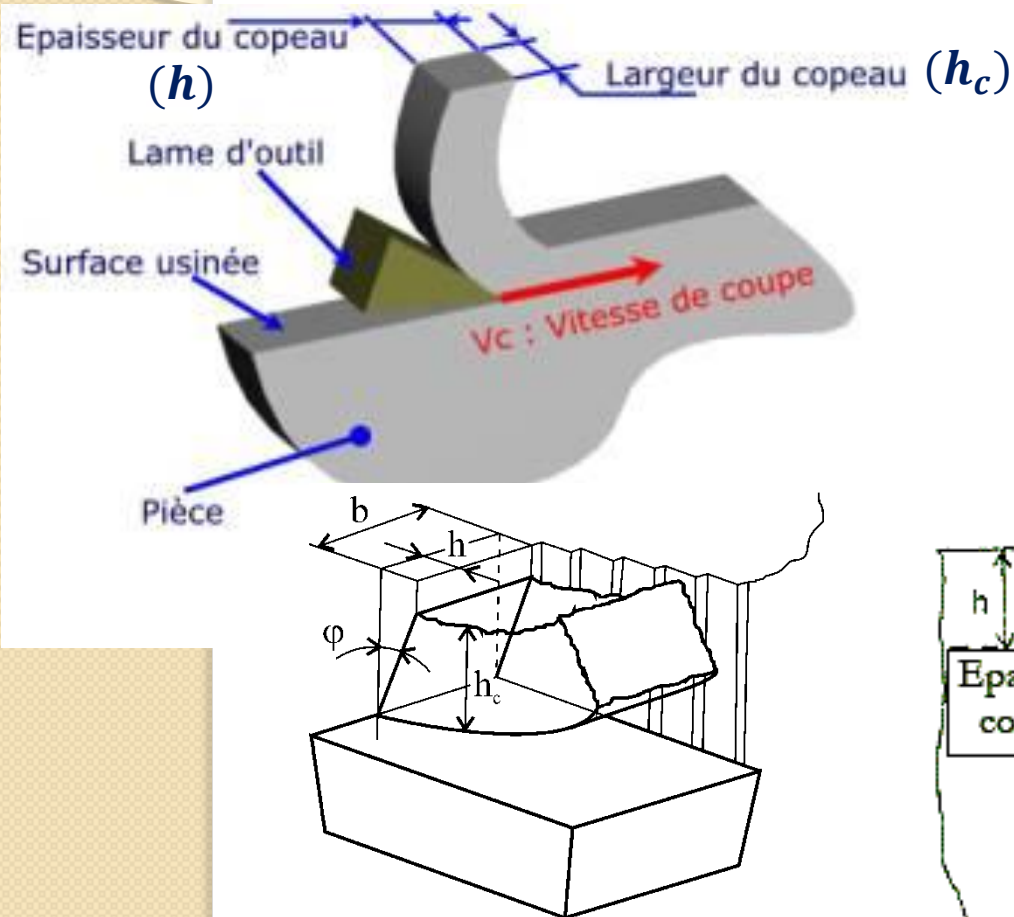
3 - zone de glissement sur la face de coupe (Zone d'écoulement)

4 - zone de pression et coupe

5 - zone de glissement secondaire sur la face de dépouille.



Définition des zones de cisaillement

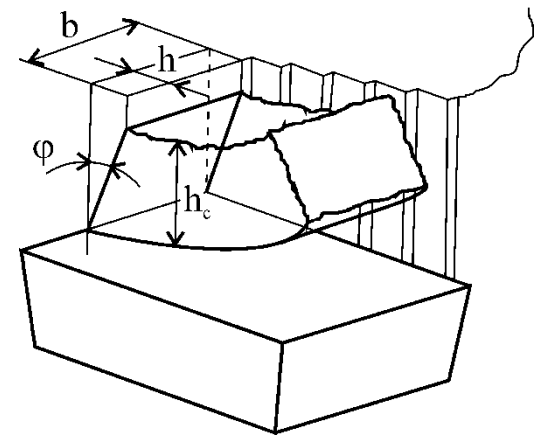


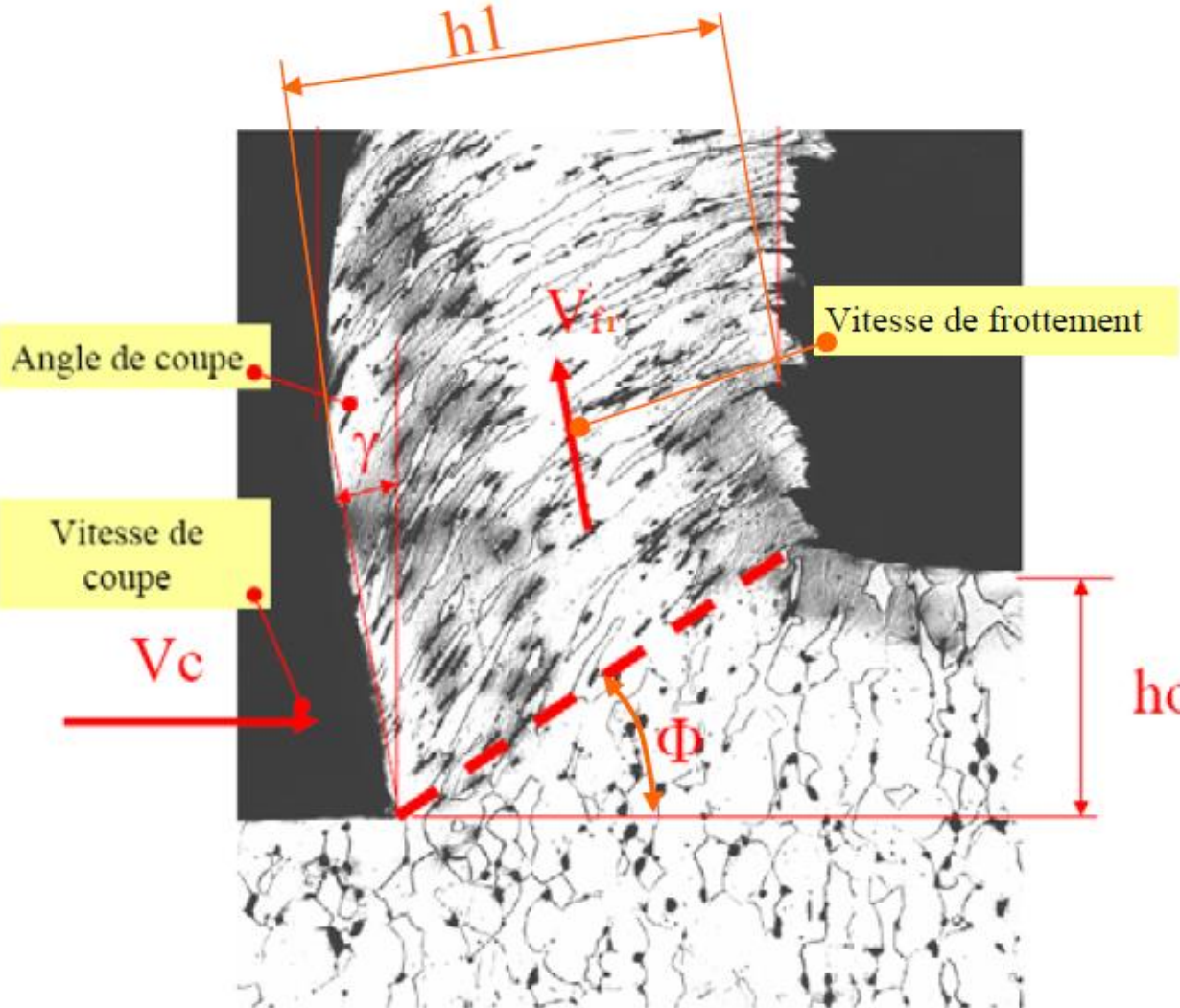
Coefficient de refoulement

Un paramètre très important, qui caractérise l'importance des déformations dans la zone de coupe est l'angle de cisaillement ϕ . Plus cet angle est petit, plus la longueur de la zone de cisaillement ainsi que les déformations dans cette zone sont grandes. La mesure de cet angle est très difficile et coûteuse. Notons toutefois que l'angle de cisaillement influence aussi l'épaisseur h_1 du copeau. La relation entre h_1 et h_0 est appelée coefficient de refoulement Λ_h . Il peut être utilisé comme autre mesure, facilitant l'estimation de l'angle de cisaillement.

$$\Lambda_h = \frac{h_1}{h_0}$$

le rapport $r = \frac{h_0}{h_1}$ est appelé rapport de compression ($r=1/\Lambda_h$),





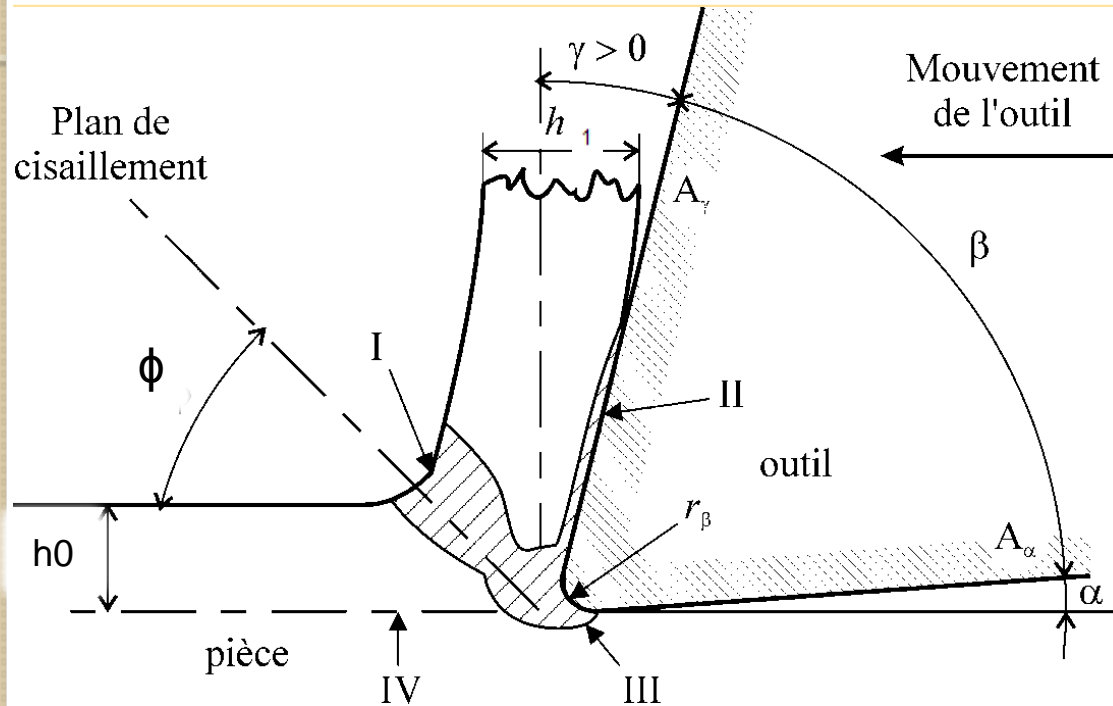
L'épaisseur du copeau indéformé (h_0) est plus petite que l'épaisseur du copeau (h_1). Le rapport $r = h_0/h_1$ est dit rapport de compression.

La mesure de r permet de connaître l'orientation (angle Φ) du plan de cisaillement.

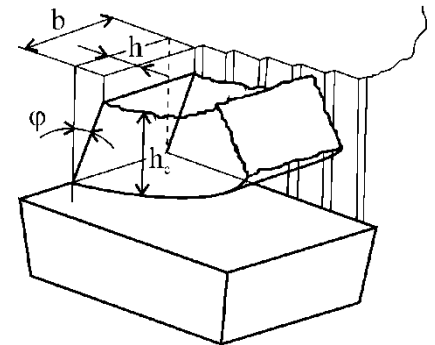
L'orientation du plan de cisaillement influence les forces de coupe et la vitesse de frottement (V_{fr}) sur la face de coupe.

Figure - Géométrie de la formation du copeau – h_0 - surépaisseur d'usinage, ϕ - angle de cisaillement, h_1 - épaisseur du copeau, α - angle de dépouille, β - angle de taillant, γ - angle de coupe

Description des zones de la formation du copeau



L'angle de coupe γ définit la coupe, qui est positive si $\gamma > 0$ et négative si $\gamma < 0$. L'arête de coupe n'est jamais parfaitement aiguë. L'acuité de l'arête est définie par le rayon r_β de la zone de raccordement entre la face de coupe et la face de dépouille.



Afin que l'outil ne frotte pas sur la face usinée, il faut que la face de dépouille fasse un angle α avec la face usinée. Le dièdre de l'outil fait un angle β appelé angle de taillant. Par convention, la somme des angles de dépouille α , de taillant β et de coupe γ mesurés dans le plan de l'outil est toujours égale à 90° .

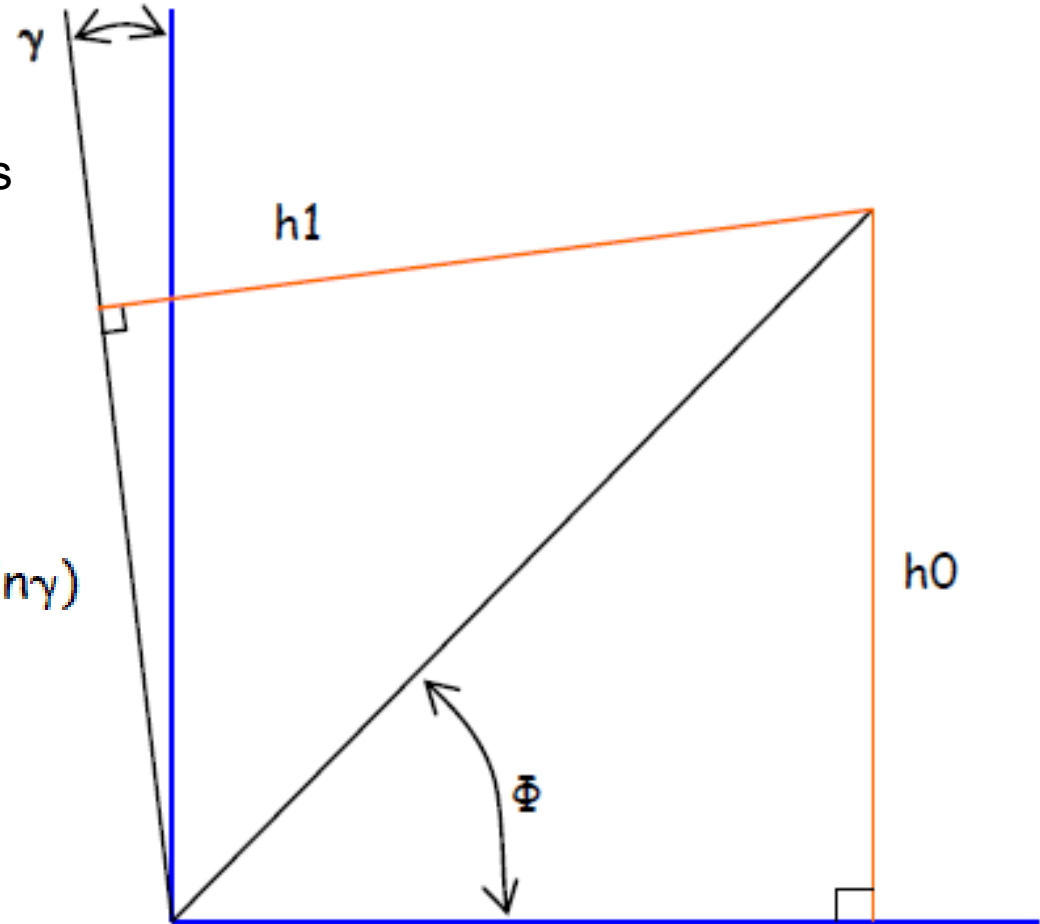
$$\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ$$

Détermination de l'angle de cisaillement

Sur le graphique on peut déterminer l'angle Φ pour les angles de coupes usuels.

$$r = h_0 / h_1$$

$$\tan \Phi = r \cos \gamma / (1 - r \sin \gamma)$$



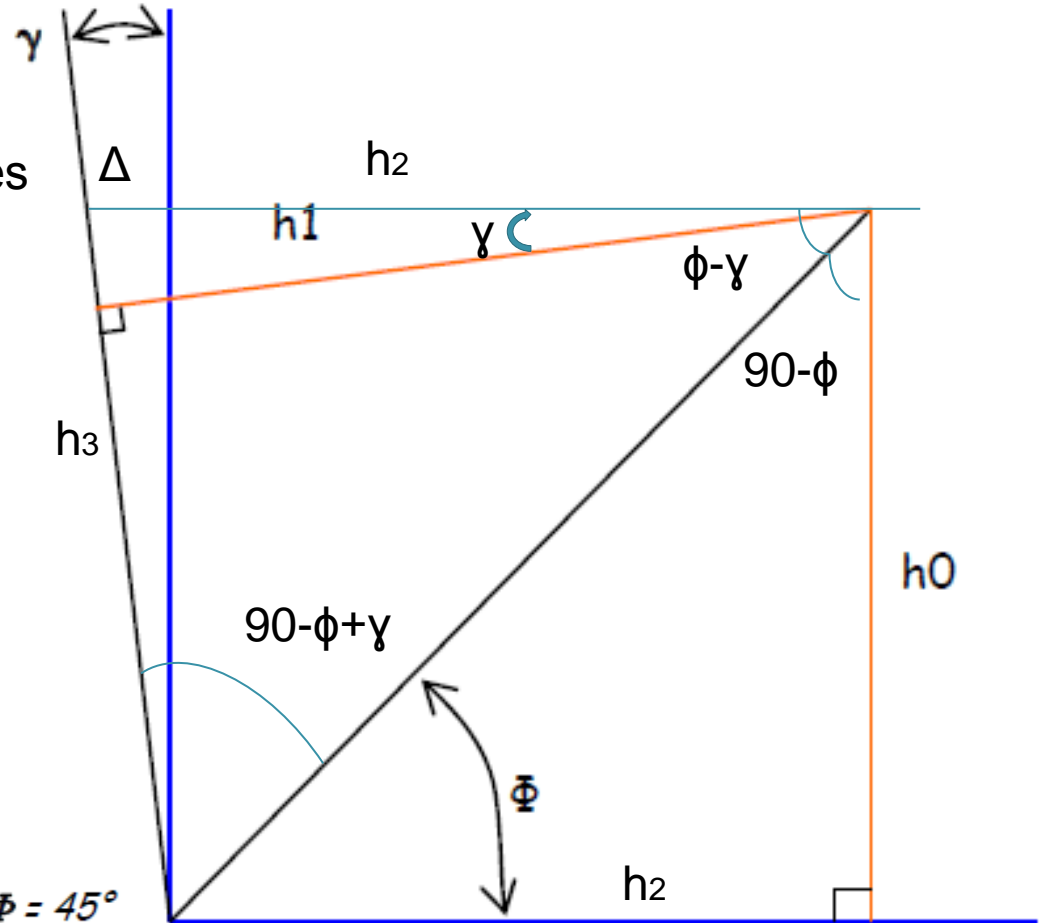
Détermination de l'angle de cisaillement

Sur le graphique on peut déterminer l'angle Φ pour les angles de coupes usuels.

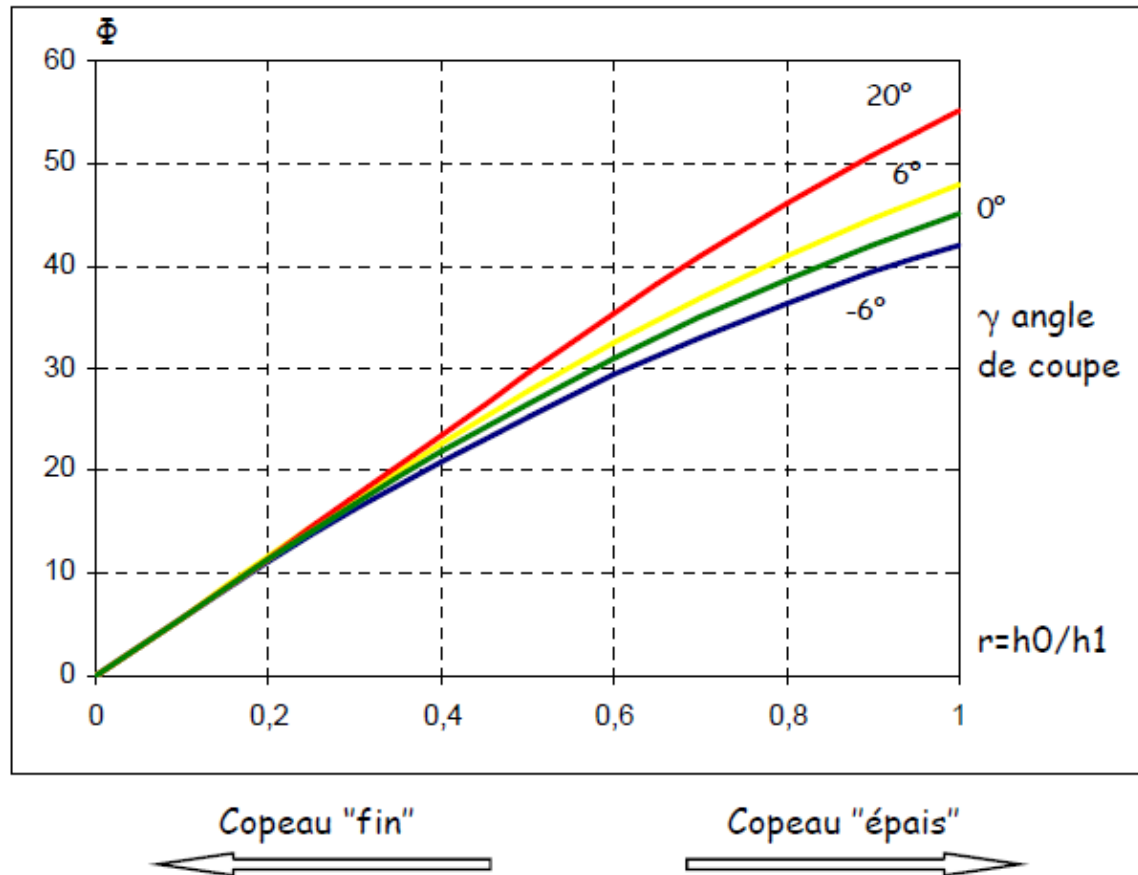
$$r = h_0 / h_1$$

$$\tan \Phi = r \cos \gamma / (1 - r \sin \gamma)$$

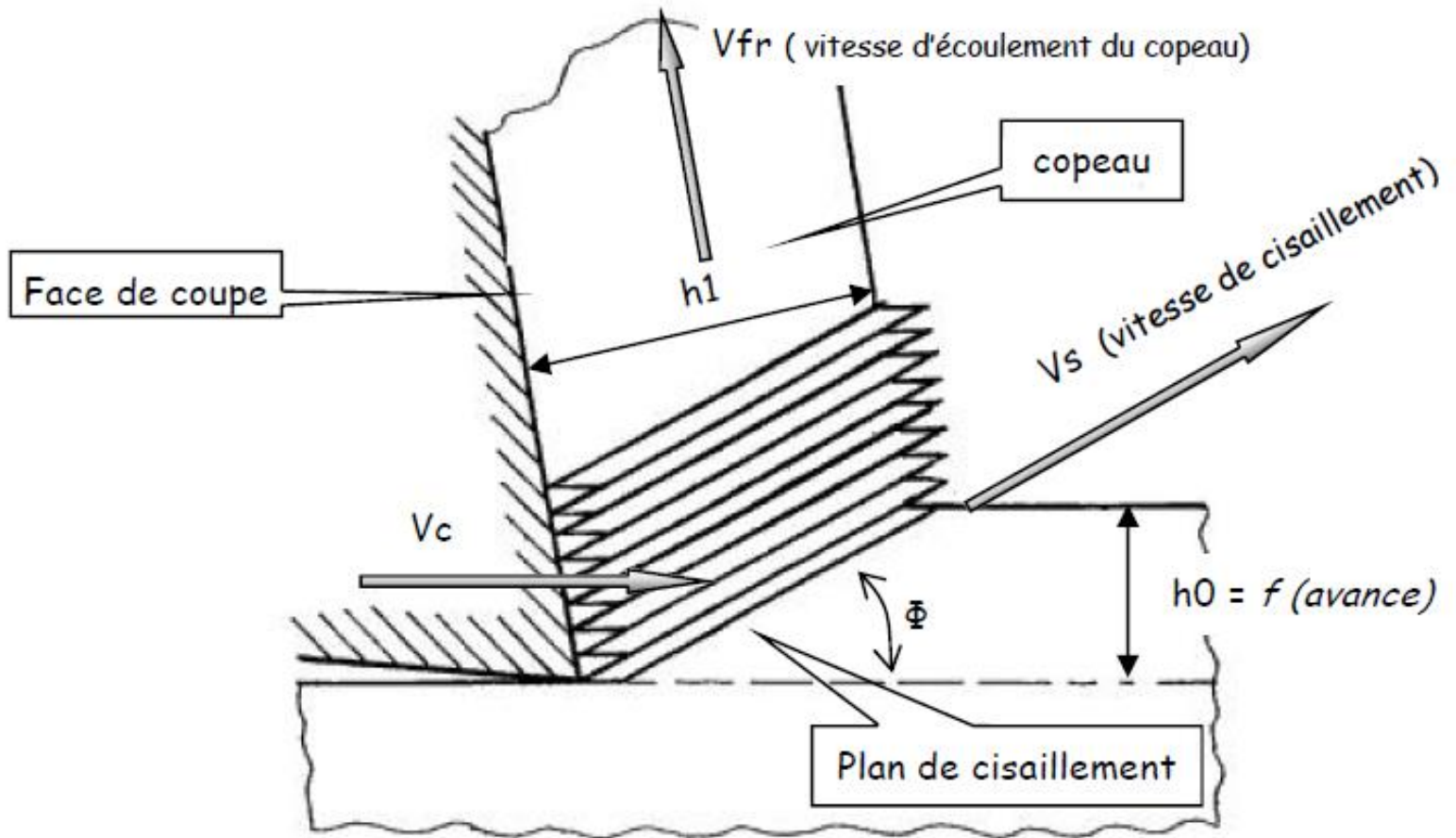
Remarque: si $h_0 = h_1$ et $\gamma = 0$ alors $\Phi = 45^\circ$



Détermination de l'angle de cisaillement



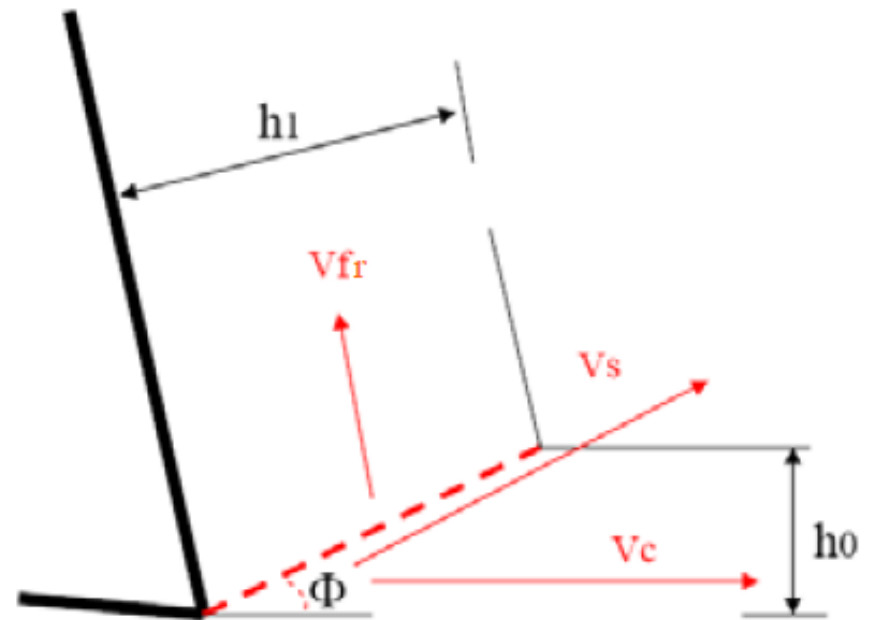
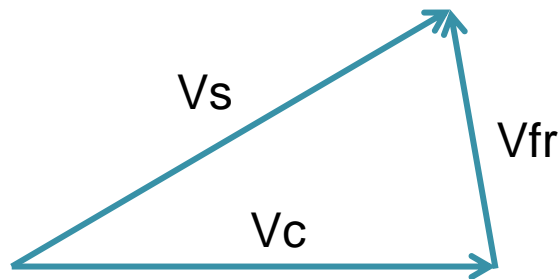
Cette théorie n'est viable que dans le cas de copeaux fractionnés (f important).



Relation entre les vecteurs vitesses

On peut écrire la somme vectorielle:

$$V_s = V_c + V_{fr}$$



Relation entre les vecteurs vitesses

Projections dans le repère $(0,x,y)$

Sur oy:

$$V_{fr} \cos \gamma = V_s \sin \Phi$$

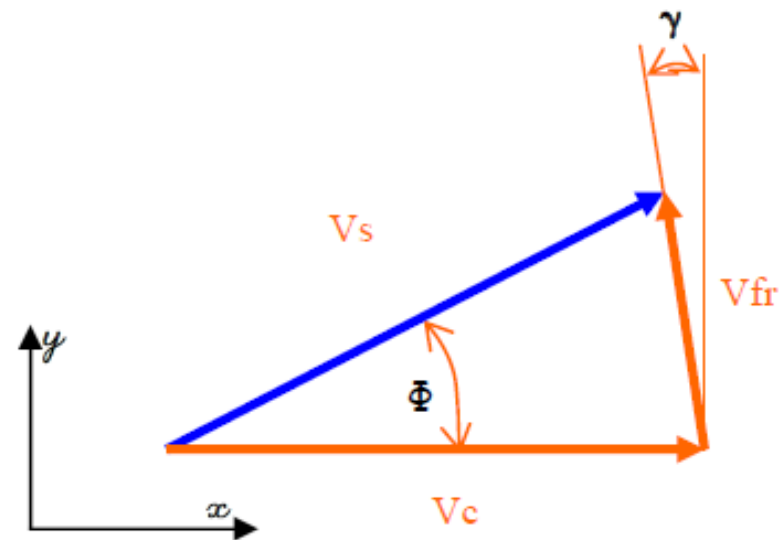
$$V_s / V_{fr} = \cos \gamma / \sin \Phi$$

Débit de copeaux

$$V_{fr} \times h_1 = V_c \times h_0$$

$$V_{fr} = V_c \times h_0 / h_1$$

$$V_{fr} = r \times V_c$$



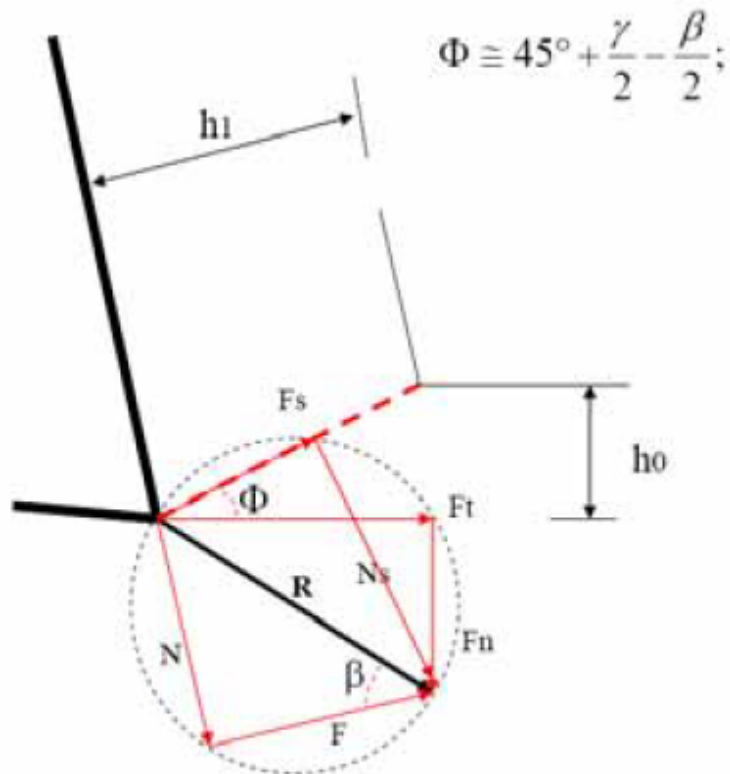
Analyse des efforts

Les composantes de la force de coupe R peuvent être reliées avec des relations trigonométriques assez simples.

Ces relations peuvent être utiles pour élaborer des données acquises pendant des essais et donner des informations utiles pour la caractérisation des outils ou l'analyse du processus de coupe.

Il est possible d'établir les relations suivantes entre les composantes de l'effort de coupe :

Analyse des efforts



F_t : effort tangentiel

$$F_t = R \cos(\beta - \gamma);$$

F_n : effort transversal

$$F_n = R \sin(\beta - \gamma);$$

F : effort normal à l'outil

$$F = R \cos \beta;$$

N : effort de frottement

$$N = R \sin \beta;$$

F_s : effort de cisaillement

$$F_s = R \cos(\Phi + \beta - \gamma);$$

N_s : effort de compression

$$N_s = R \sin(\Phi + \beta - \gamma);$$

- Φ Angle de cisaillement
- γ Angle de Coupe de l'outil
- β Angle normal (différent de l'angle de tranchant de l'outil)

Analyse des efforts de coupe

En analysant l'allure du tracé de l'effort de coupe obtenue pendant le tournage, on peut distinguer différentes phases. Pendant l'engagement de l'outil dans le matériau, l'effort de coupe augmente jusqu'à une certaine valeur. Ensuite, malgré les variations des efforts, sa valeur moyenne reste sensiblement stable. Pendant le dégagement de l'outil ou l'arrêt de l'avance l'effort diminue. Si l'outil n'est pas complètement dégagé, il reste certains efforts de frottement contre le matériau.

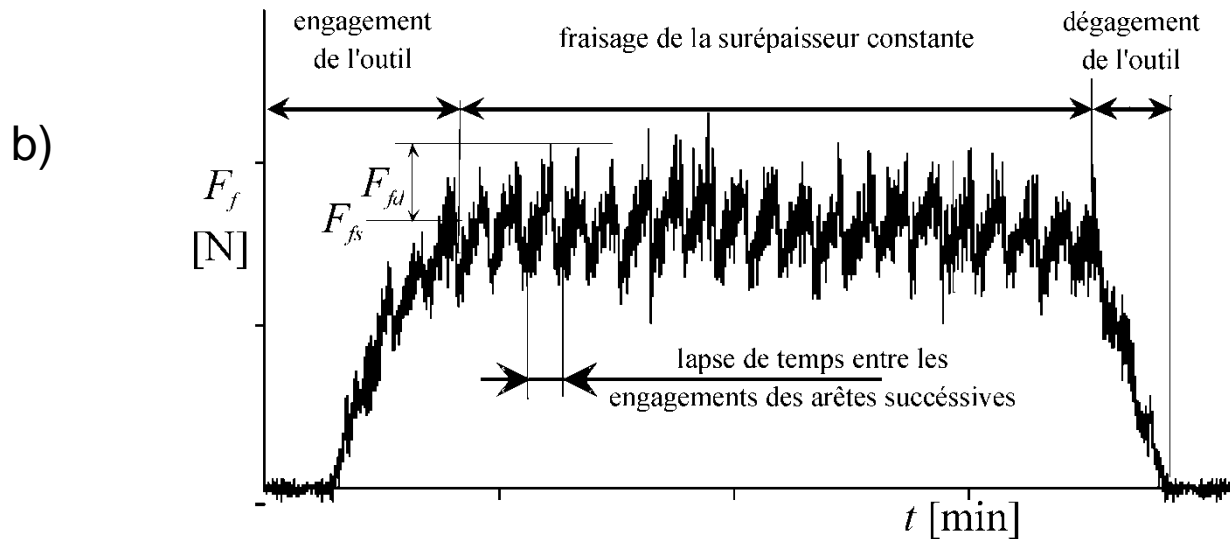
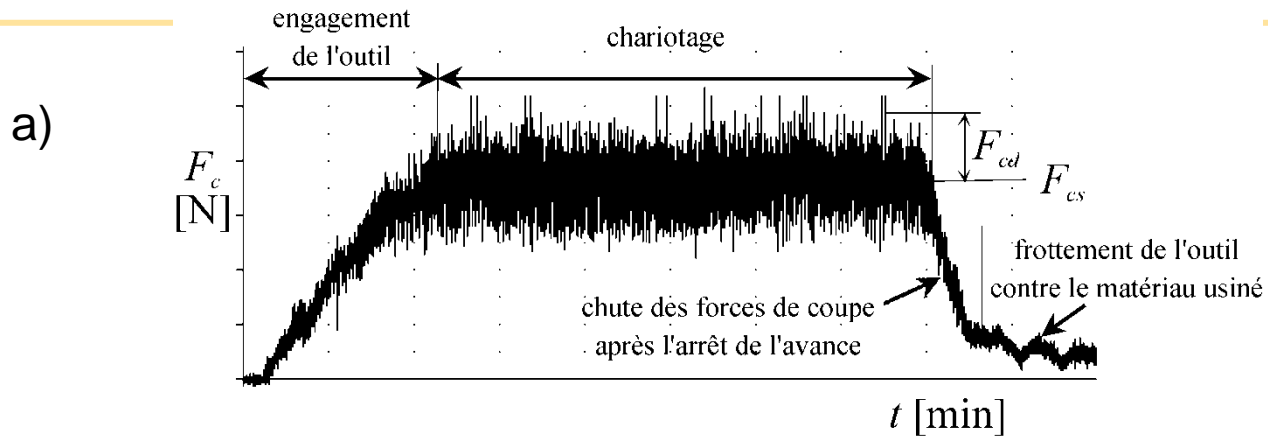
Analyse des efforts de coupe

Il est à noter, que l'effort moyen F_{cs} est relativement stable et accompagnée d'une composante aléatoire plus ou moins grande F_{cd} , qui résulte des caractères discontinus des déformations dans la zone de coupe ainsi que de la formation du copeau. Son amplitude peut atteindre quelques dizaines de pour-cent de la valeur moyenne de l'effort de coupe.

Analyse des efforts de coupe

Pendant l'usinage avec les outils à arrêtes multiples (fraisage), le nombre d'arêtes engagées simultanément et l'ensemble des section du copeau ne sont pas constants. Le tracé est analogue au celui du tournage, mais accompagné d'une variation supplémentaire due aux engagements et dégagements successifs des arêtes de coupe.

Effort de coupe



Pression spécifique de coupe

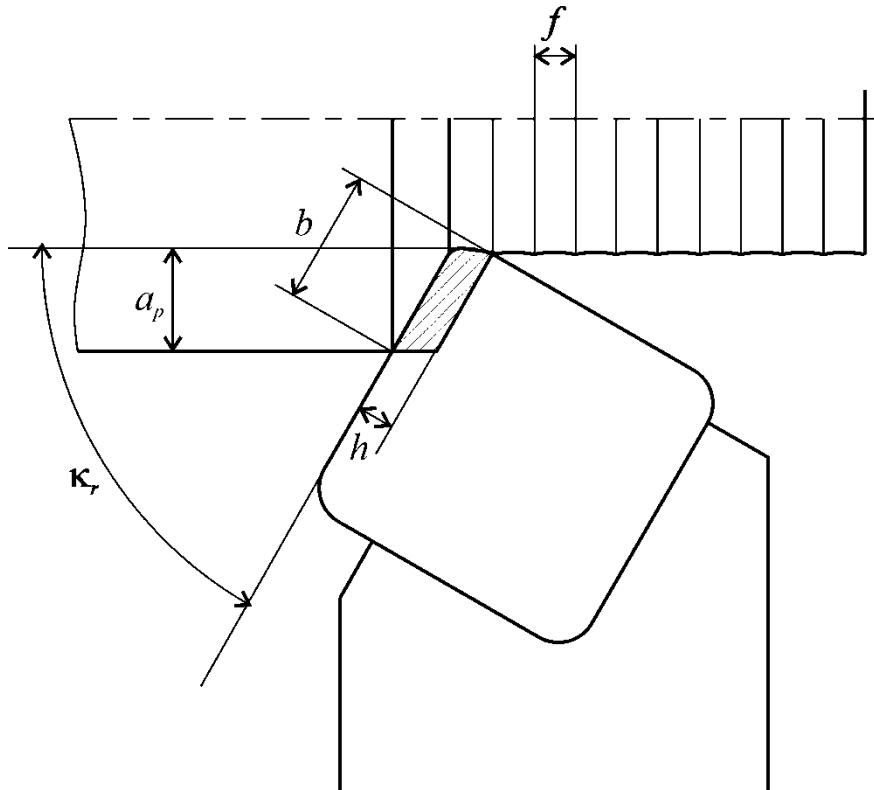
La pression spécifique de coupe s'exprime par la relation:

$$k_s = \frac{F_c}{A_C}$$

où F_c est l'effort de coupe tangent à la pièce; $A_C = b \times h$ est l'aire de la section de coupe.

La pression spécifique de coupe n'est pas fonction de la vitesse de coupe. Elle diminue quand l'angle de coupe γ et l'épaisseur de coupe (avance) augmente. Cette diminution est d'autant plus importante que le rapport f/a_p de l'avance à la profondeur de coupe est grand. C'est au voisinage du copeau minimal (le plus petit copeau possible à enlever) que cette pression est la plus forte.

Définition de l'aire de la section de coupe

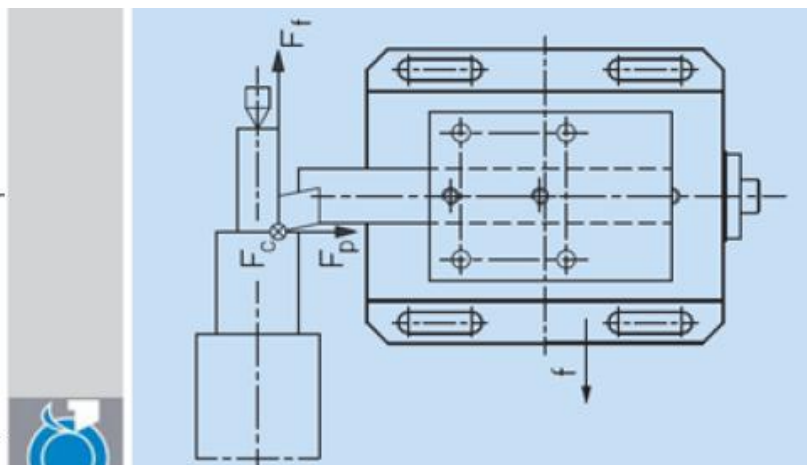


Définition de l'aire de la section de coupe

Systeme d'acquisition des forces

• Tournage

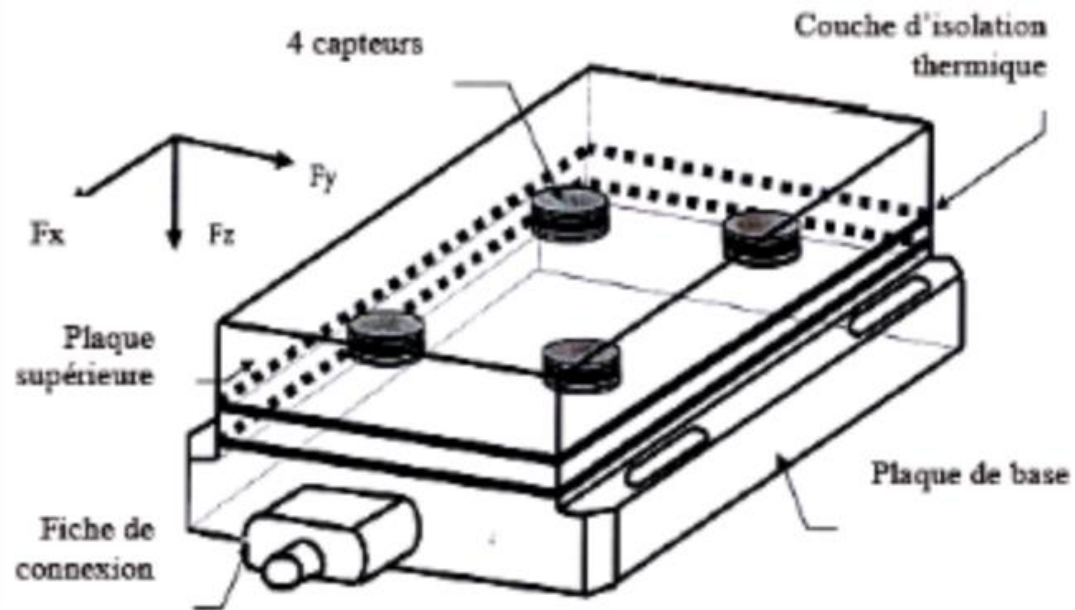
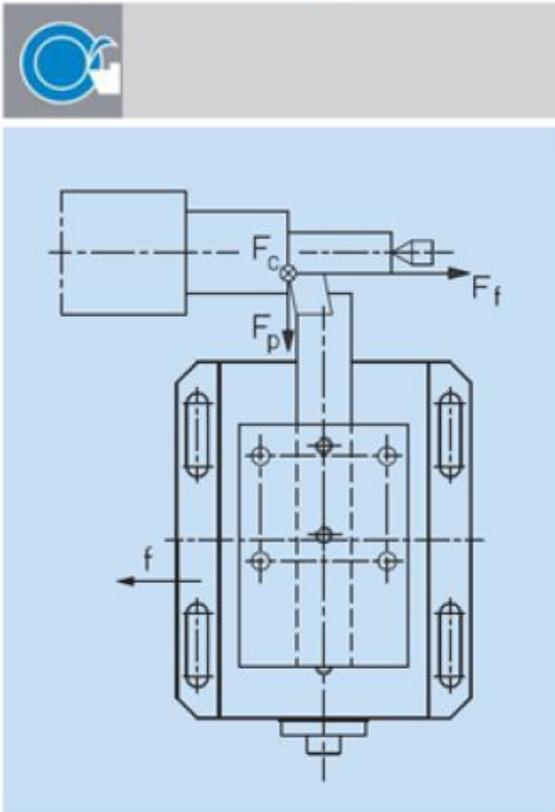
Depuis plus de 35 ans, Kistler utilise le système de mesure piézoélectrique des forces (Figure), au profit d'une technique innovatrice, apportant une contribution exemplaire à la sécurité et à la rentabilité, ce système de mesure se distingue beaucoup des autres méthodes de mesure, les forces agissant sur l'élément en quartz sont converties en charges électriques proportionnelles, En tournage la pièce à usinée est animée d'un mouvement de rotation, l'outil de coupe doit être solidement fixé au dynamomètre, qui est monté sur le chariot de la machine-outil.



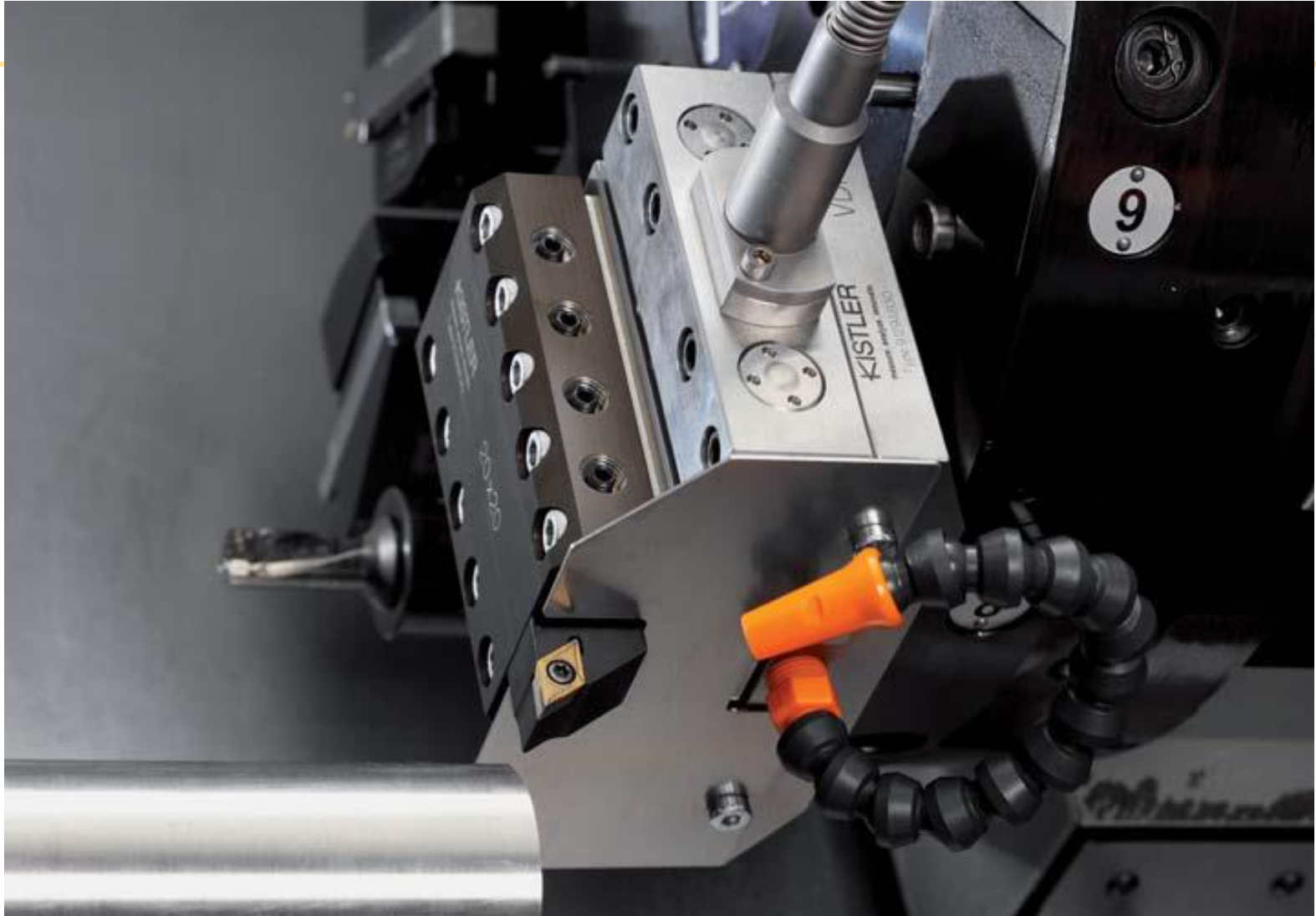
Mesure en tournage

- La force ainsi produite lors du processus de tournage est alors directement exprimée par 3 composantes grâce au dynamomètre multi-composantes à savoir:
 - - Force axial : F_x (F_a).
 - - Force radial : F_y (F_p).
 - - Force tangentiel : F_z (F_v).

Mesure en tournage

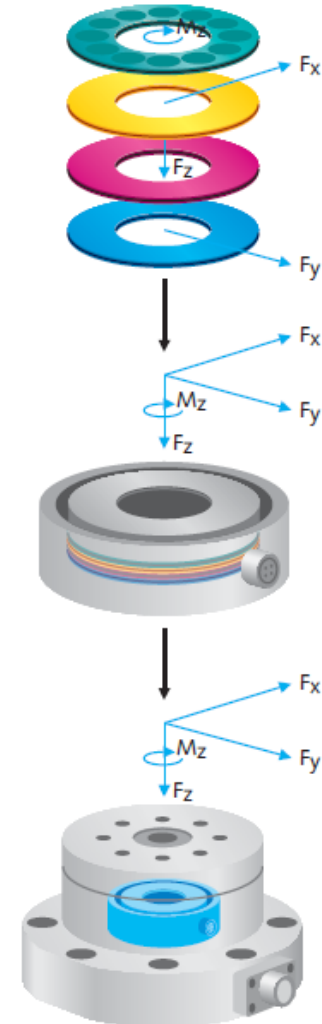
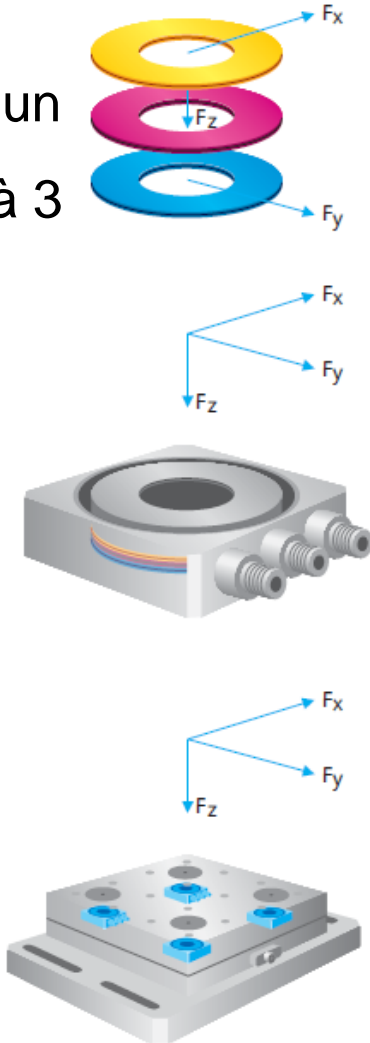


Mesure en tournage



Capteurs de force piézoélectriques

Construction d'un dynamomètre à 3 composants (F_x , F_y , F_z)



Construction d'un dynamomètre à 3 composants (F_x , F_y , F_z , M_z)

Mesure en tournage

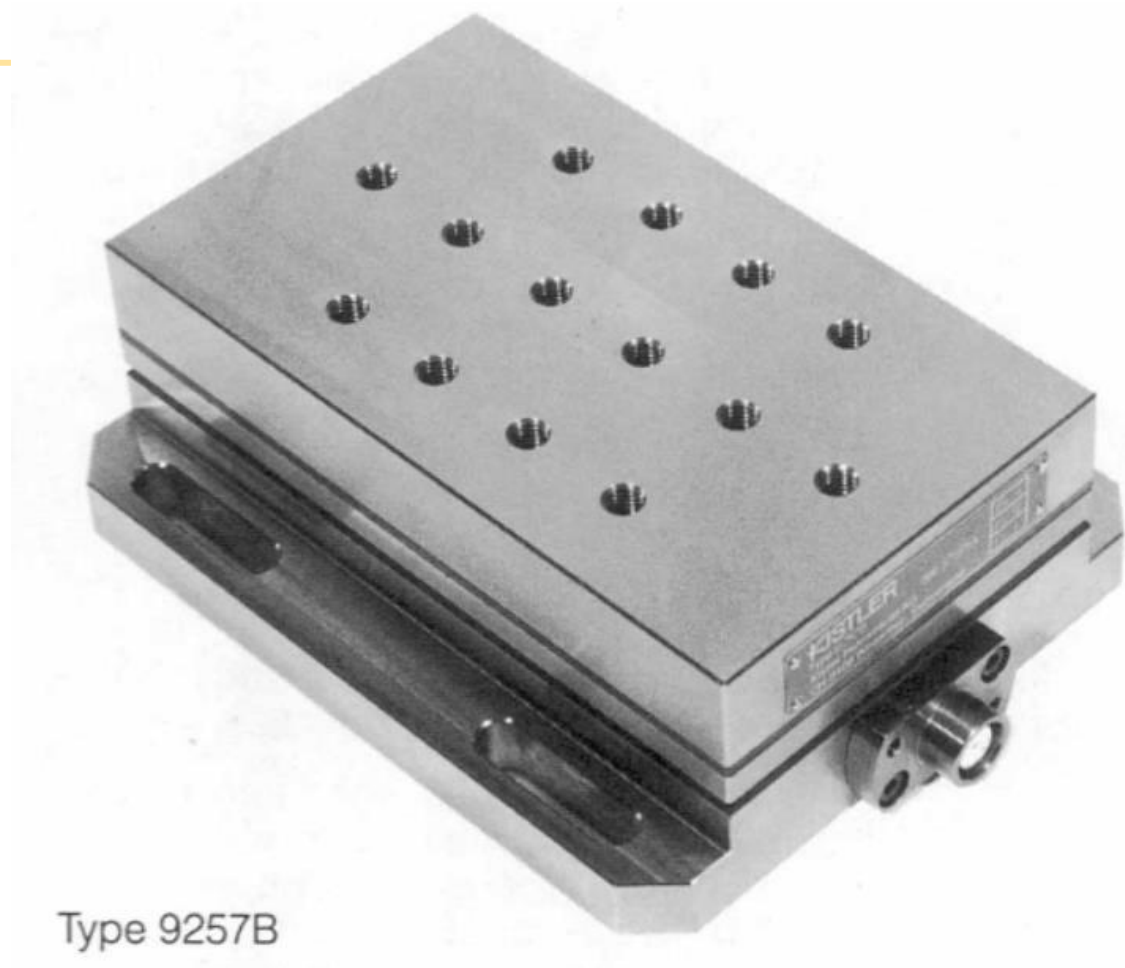


Plate forme de mesure des efforts « Kistler »

Mesure en tournage

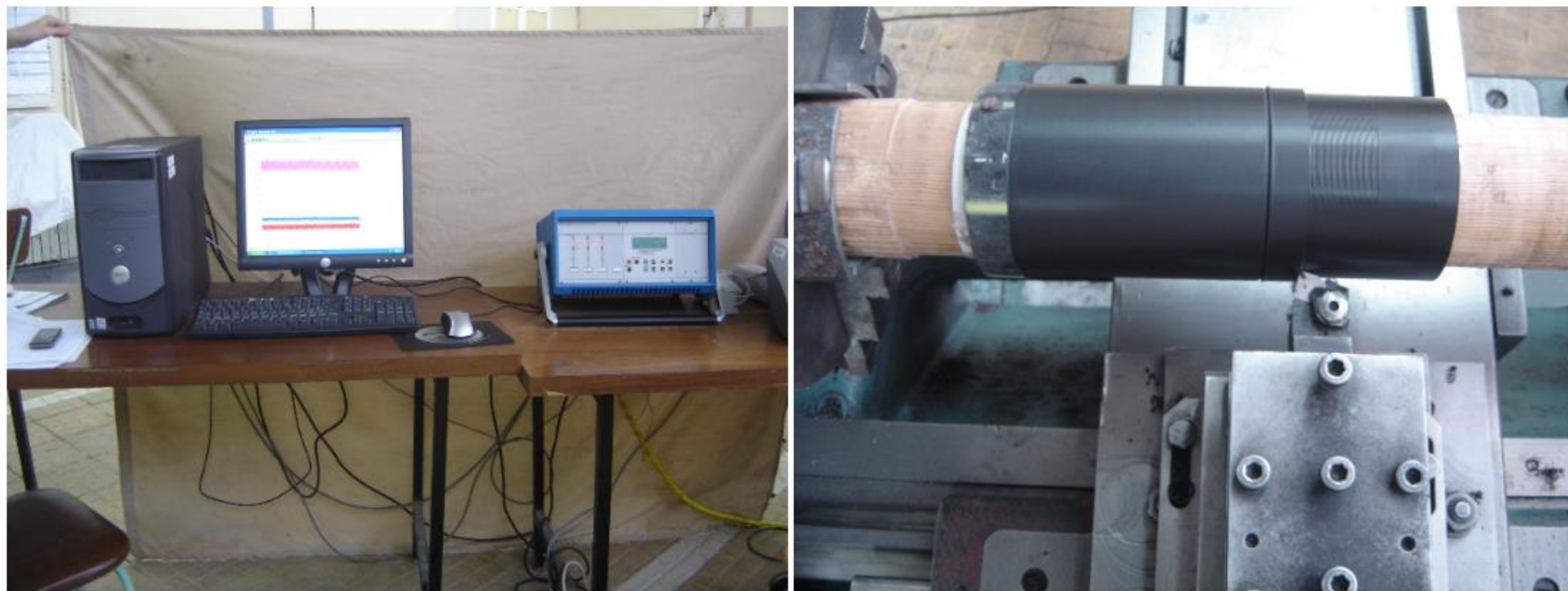
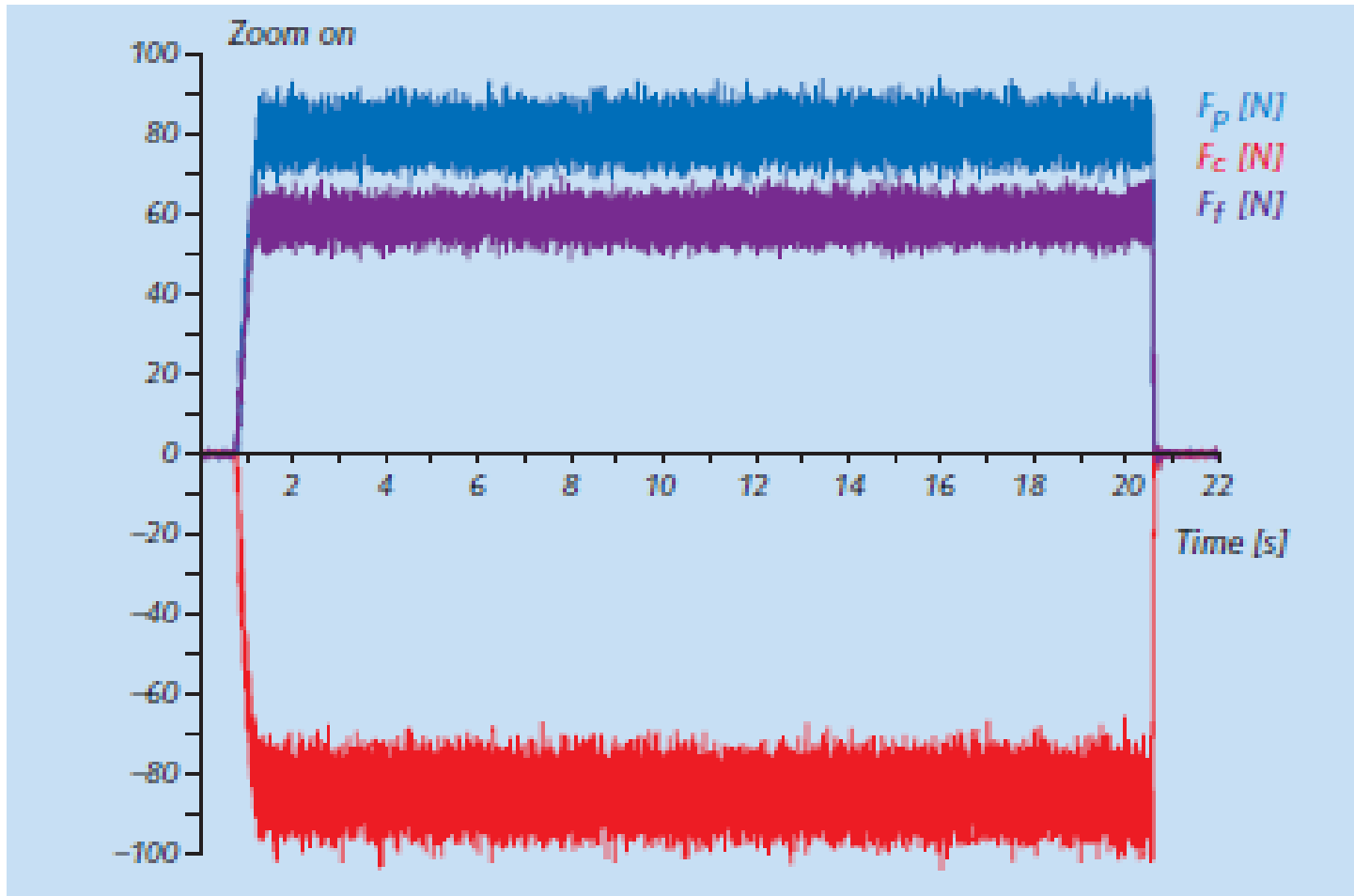
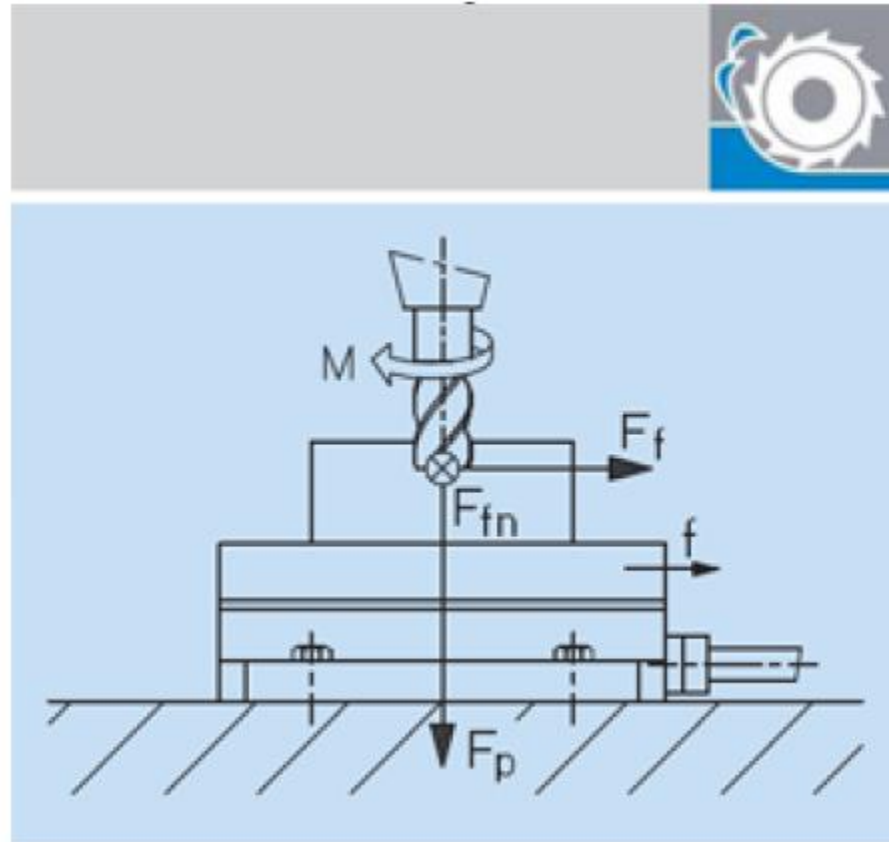


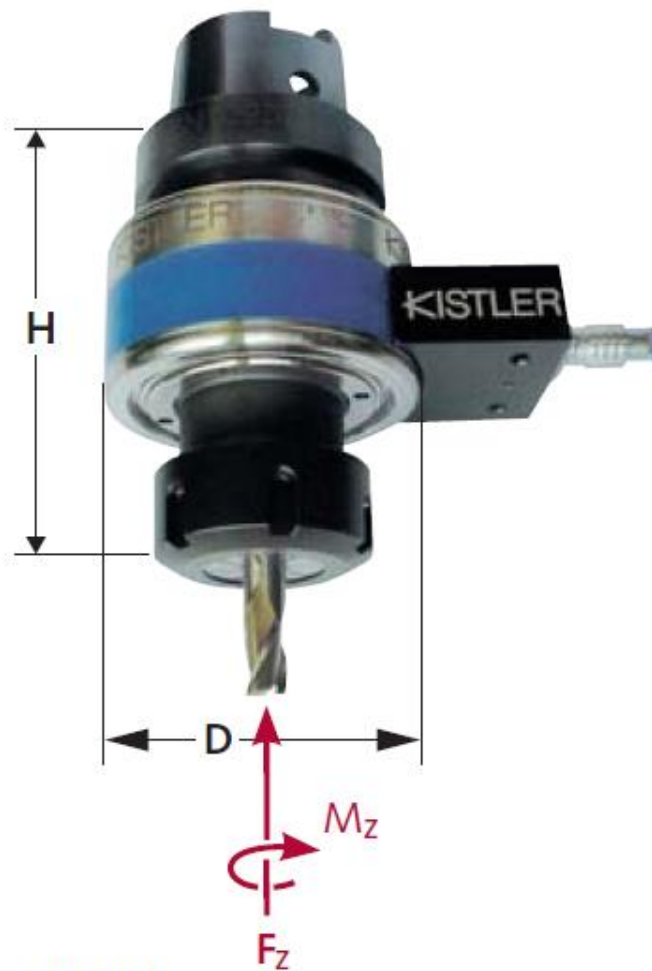
Figure 17 : Chaîne de mesure des efforts de coupe.

Mesure en tournage

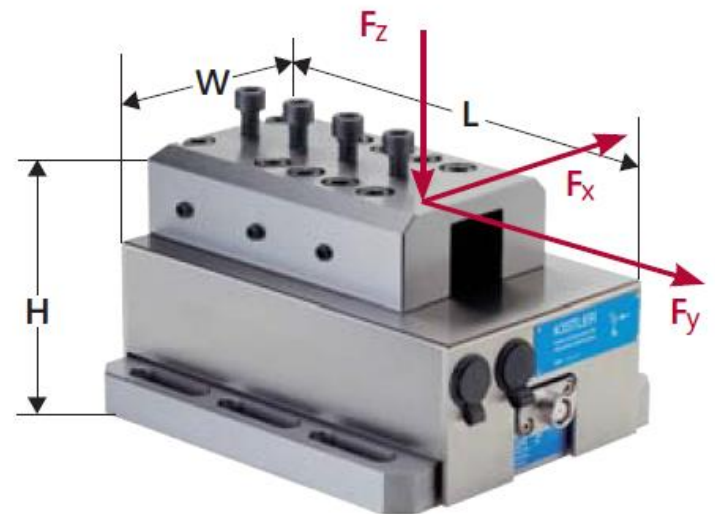
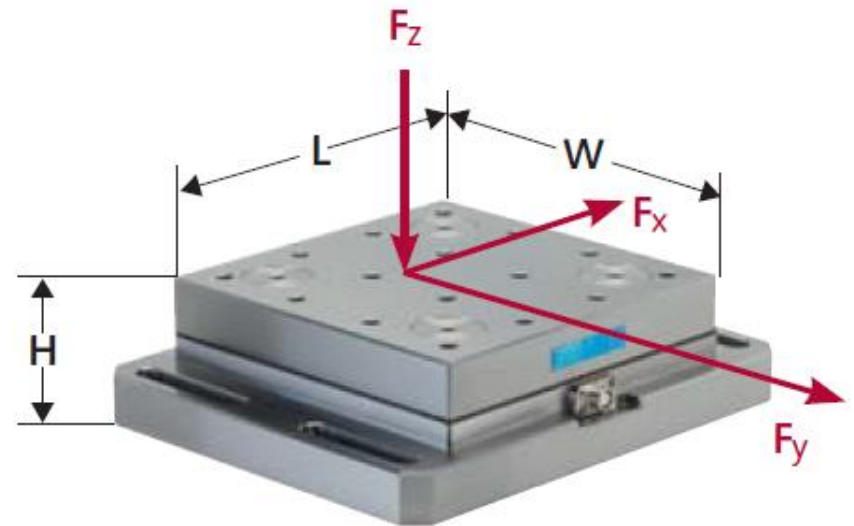


Mesure en Fraisage





Type 9125A...



Mesure en Fraisage



Fraisage avec plaque
dynamométrique statique
Type 9255B

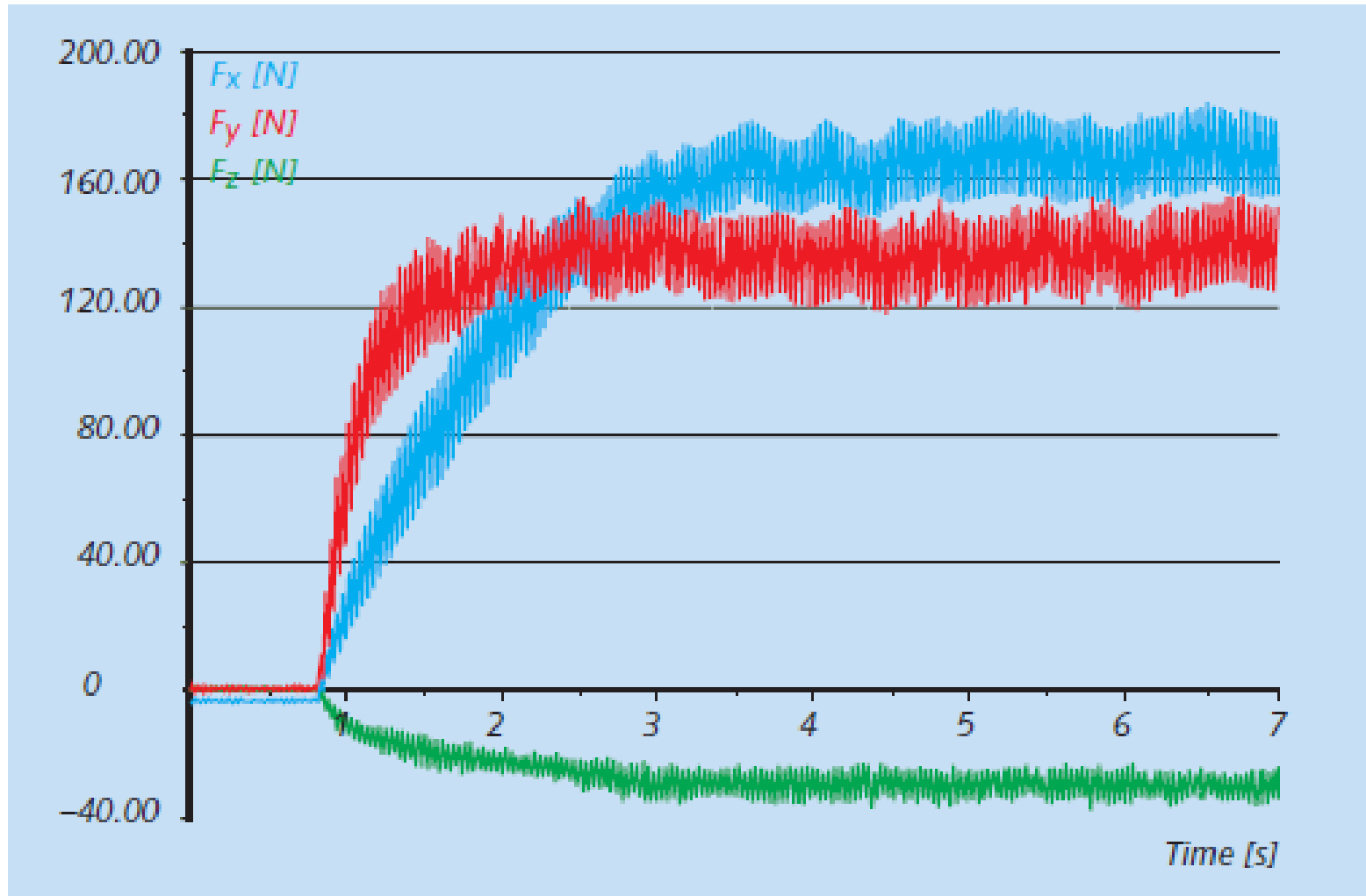


Fraisage avec plaque
dynamométrique *dynamique*
Type 9125A

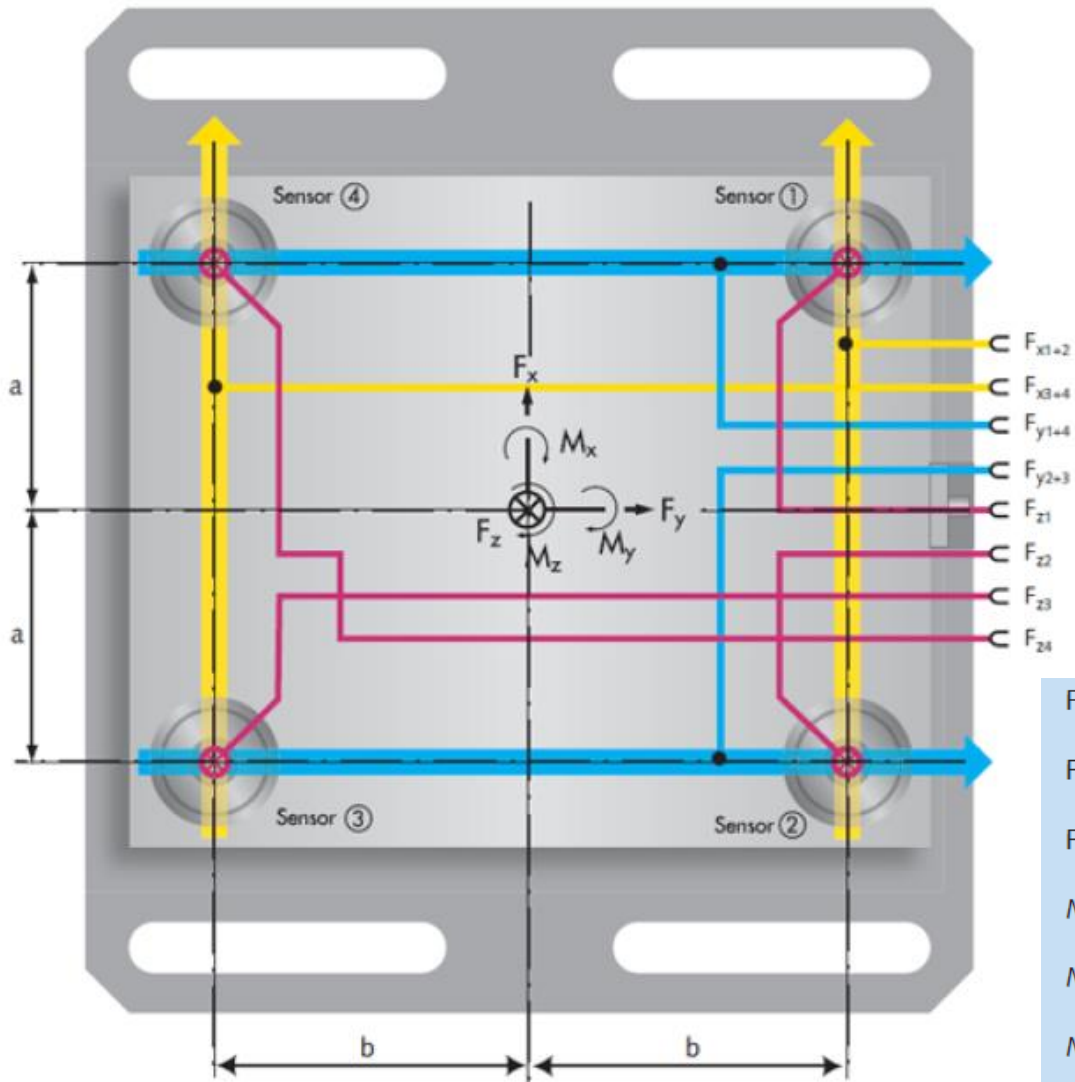
Mesure en Fraisage



Mesure en Fraisage



Mesure en Fraisage



$$\begin{aligned}
 F_x &= F_{x1+2} + F_{x3+4} \\
 F_y &= F_{y1+4} + F_{y2+3} \\
 F_z &= F_{z1} + F_{z2} + F_{z3} + F_{z4} \\
 M_x &= b (F_{z1} + F_{z2} - F_{z3} - F_{z4}) \\
 M_y &= a (-F_{z1} + F_{z2} + F_{z3} - F_{z4}) \\
 M_z &= b (-F_{x1+2} + F_{x3+4}) + a (F_{y1+4} - F_{y2+3})
 \end{aligned}$$

Mesure en Fraisage

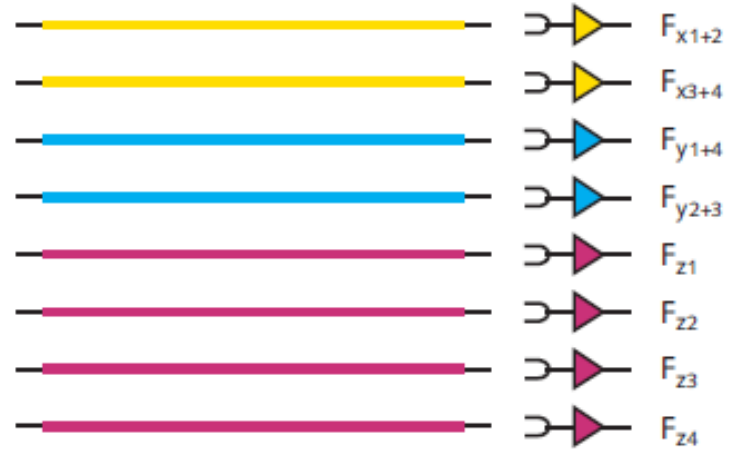
3-core connecting cable

3 charge amp. channels

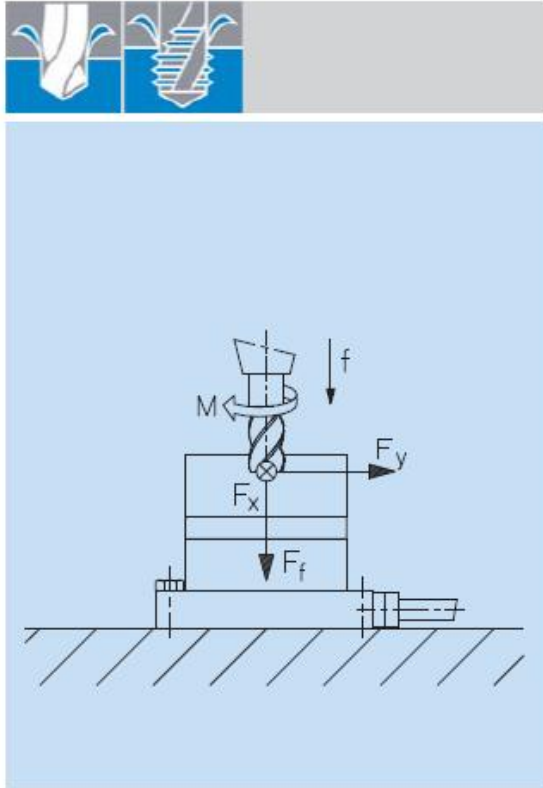


8-core connecting cable

8 charge amp. channels



Mesure en Perçage



Forces during drilling

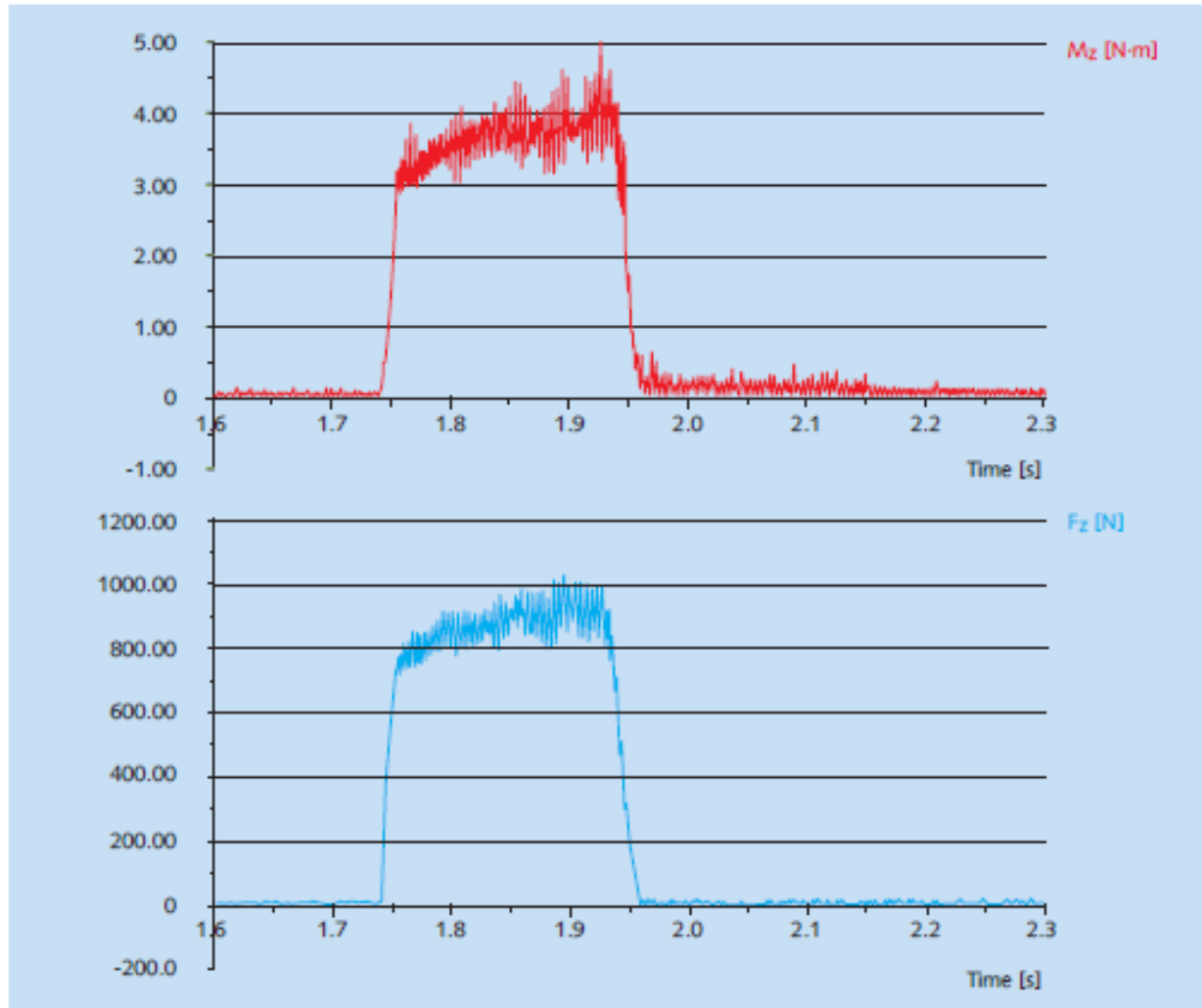


*Drilling with the rotating system
Type 9125A...*



*Drilling with stationary dynamometer
Type 9272*

Mesure en Perçage



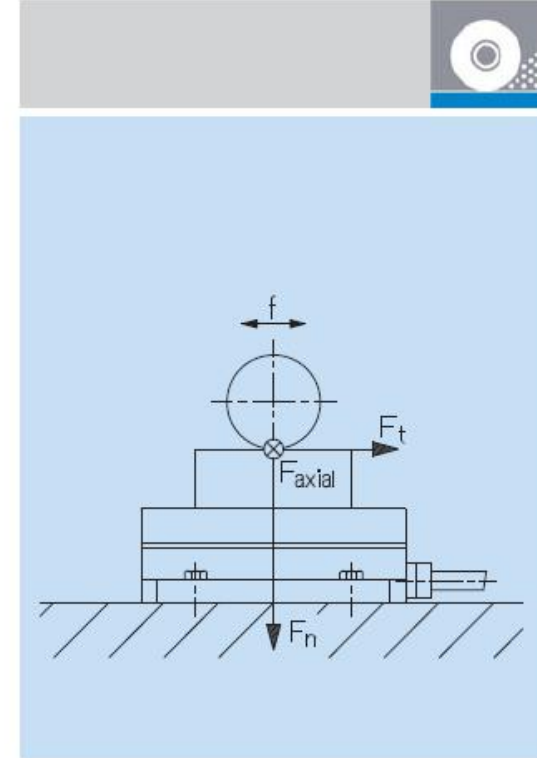
Mesure en rectification



Creepfeed grinding with force plate
 Type 9253B23



Lateral grinding of silicon workpieces with
 dynamometer Type 9256C1



Cutting force during face grinding

Puissance absorbée par la coupe

Nous pouvons partager la puissance totale en 3 composantes :

P_s - La puissance due au cisaillement.

P_{fr} - La puissance due au frottement.

P_c - La puissance due à la déformation du copeau.

$$P = P_s + P_{fr} + P_c$$

La puissance est le produit de la force par la vitesse.

$$P = F_s \times V_s + N \times V_{fr} + F_t \times V_c$$

La puissance due à la déformation du copeau a une valeur normalement réduite par rapport aux autres : 5% de P .
Nous pouvons la négliger.

$$P = F_s \times V_s + N \times V_{fr}$$

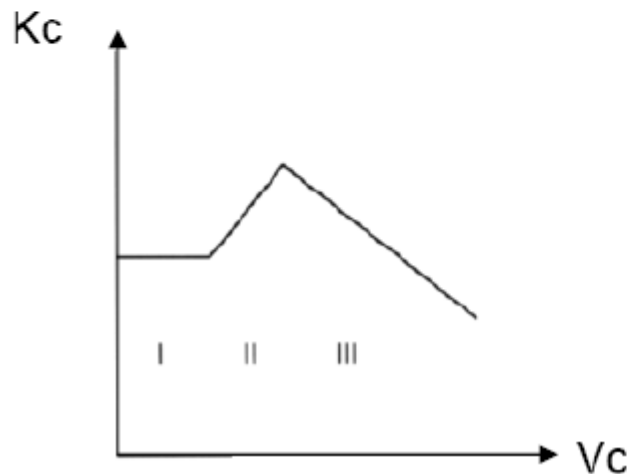
Une première explication est liée au frottement sur la face de coupe de l'outil et la force nécessaire à la déformation.

Le frottement est dû à un certain nombre de points de contact.

Si on augmente la vitesse de coupe dans un premier temps, les points de contacts augmentent et la force spécifique augmente.

La force nécessaire à la déformation plastique augmente aussi avec la vitesse, mais baisse avec l'augmentation de température.

Si on augmente encore la vitesse de coupe, la température augmente jusqu'à réduire les efforts de déformation et de frottement, qui baissent jusqu'à l'extrême quand le matériau entre en fusion.



Trois zones

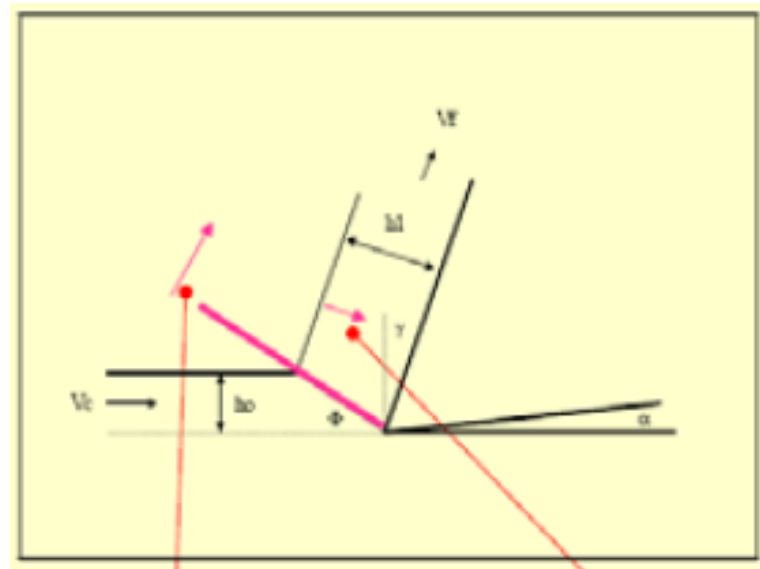
I : pression spécifique constante

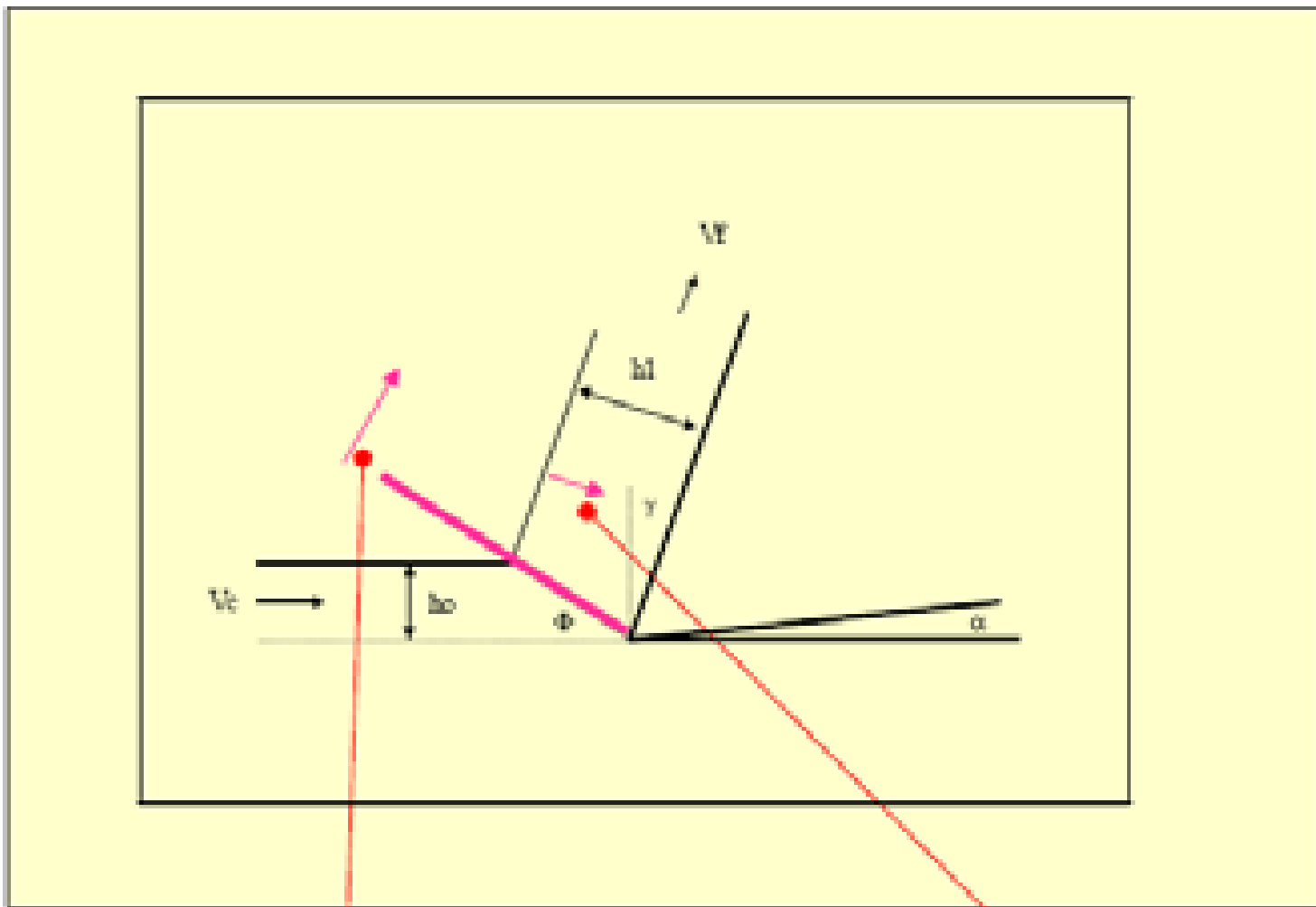
II : pression spécifique augmentant

III : pression spécifique baissant

Lorsque V_c entre dans la zone UGV:

- Le copeau glisse mieux sur la face de coupe de l'outil.
- L'angle de frottement, β , baisse.
- La force totale baisse
- le recalage se réduit (copeaux moins épais)
- Le plan de cisaillement s'oriente vers son orientation idéale ($\Phi = 45^\circ$).
- La réduction de la force de coupe amène une réduction des vibrations

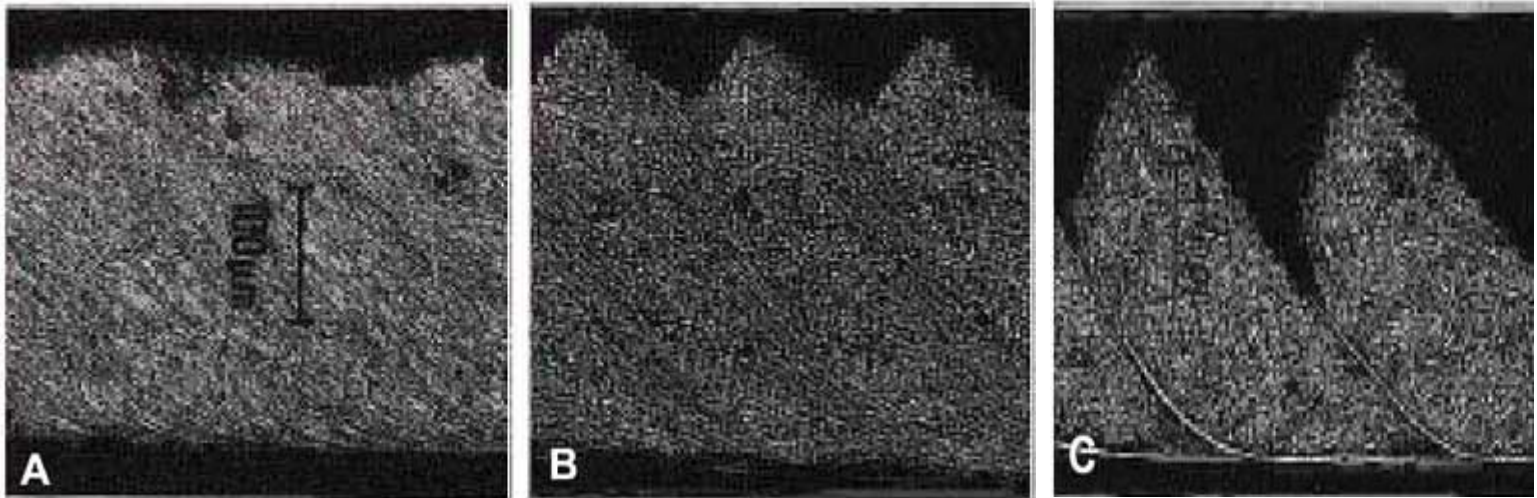




Φ augmente

L'épaisseur du copeau h_1 se rapproche à h_0

Formation du copeau en UGV



Evolution des copeaux suivant la vitesse de coupe

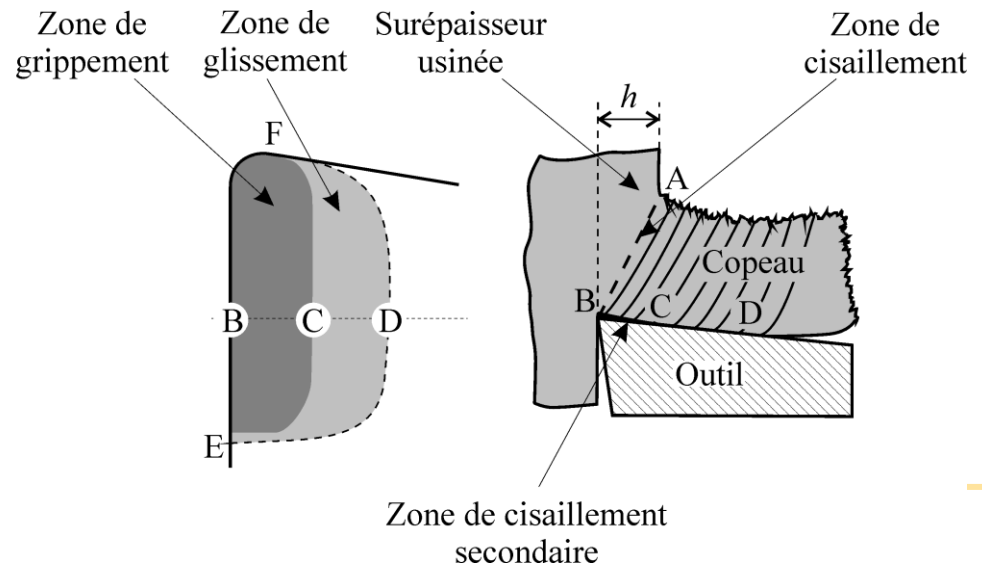
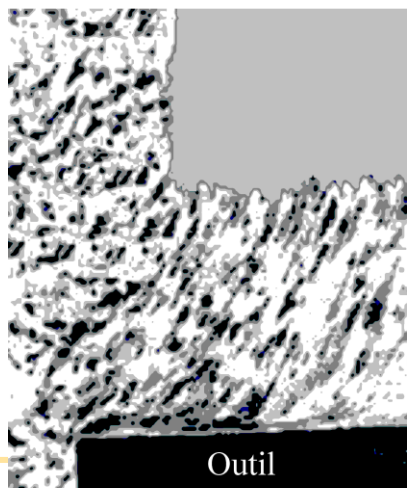
A: vitesse de coupe faible; copeau continu

B: vitesse de coupe moyenne; copeau segmenté

C: vitesse de coupe grande; copeau dentelé

Micrographie des zones de coupe et schéma des zones de grippement, glissement et cisaillement secondaire

Comme la jonction entre le copeau et la surface de l'outil dans la zone d'adhésion (grippement) est très forte, plus forte même que le matériau usiné, le copeau en déplacement cause un cisaillement appelé secondaire. Dans la zone de cisaillement secondaire les déformations sont beaucoup plus importantes que dans la zone de cisaillement, causant la disparition même des cristaux, qui dans la zone de cisaillement n'étaient que déformés. Dans la zone de cisaillement secondaire, le matériau se comporte comme un fluide de grande viscosité, plutôt qu'un solide. Pour cette raison, cette zone, dont l'épaisseur est de 20 à 50 μm , est aussi appelée zone d'écoulement. La vitesse de déplacement du matériau le long de la face de coupe part de zéro et augmente progressivement jusqu'à la vitesse propre du copeau.



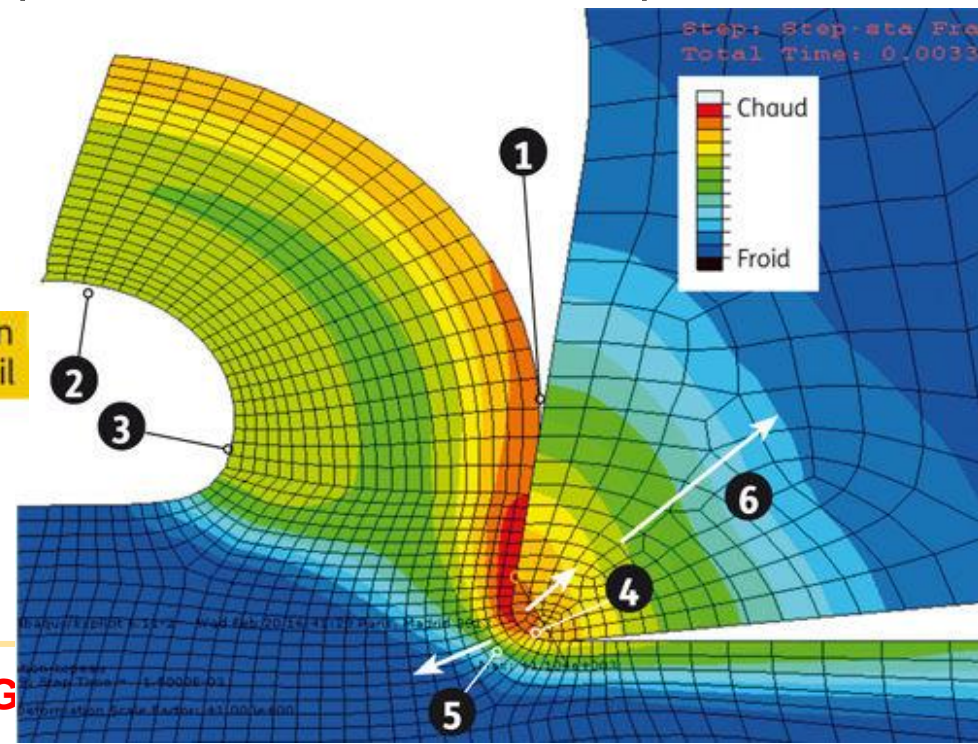
Techniques de mesure de la température en usinage

Taylor [Taylor 1907] estime que lorsque la température dans la zone de coupe atteint des valeurs trop grandes, l'usure de l'outil devient importante et la pièce usinée peut être endommagée. Depuis, un grand nombre de travaux ont été menés afin de déterminer la température et la distribution de la température à l'interface outil / pièce et outil / copeau.

Distribution des échanges de chaleur durant l'usinage

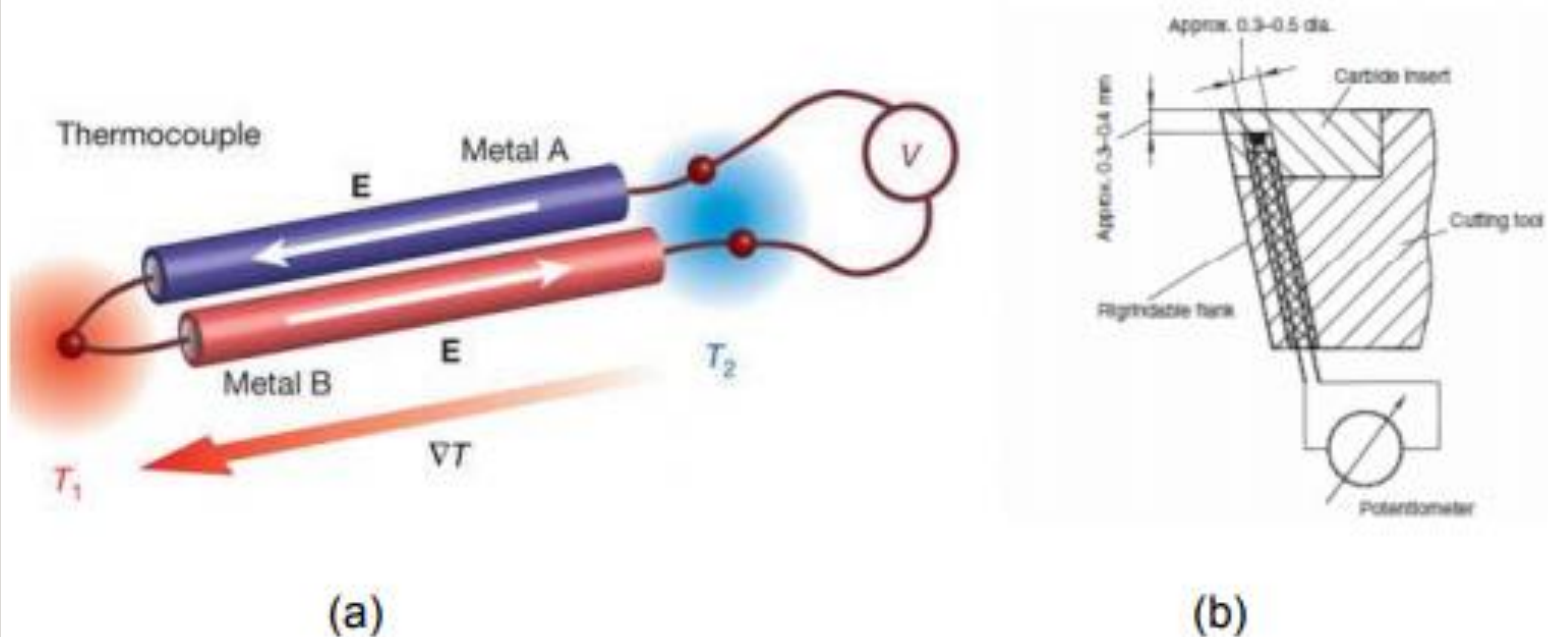
Les déformations plastiques engendrées par cisaillement dans la zone primaire peuvent atteindre des valeurs très élevées. La génération de la chaleur induite d'une part par la déformation plastique, et d'autre part par les frottements outil-copeau et outil-pièce conduit à une élévation de la température dans cette zone. La répartition de la chaleur ainsi produite se fait entre le copeau, l'outil, et la pièce.

1. Génération de chaleur due à la déformation et à la friction
2. Radiation.
3. Convection.
4. Transfert de chaleur vers l'outil
5. Conduction dans le corps de la pièce
6. Conduction dans le corps de l'outil



Mesure de la température

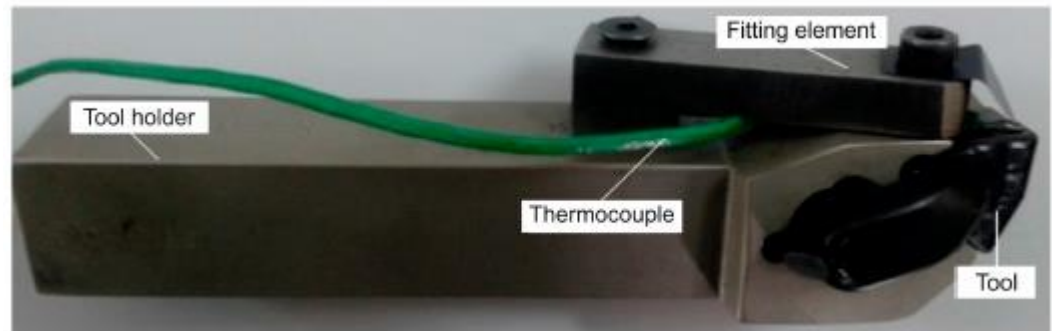
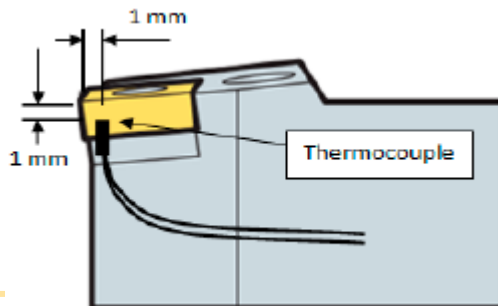
- Thermocouple



(a) Principe du thermocouple et (b) thermocouple inséré dans une plaquette en tournage [Astakov 2006]

Mesure de la température

En tournage, le thermocouple est principalement inséré dans l'outil, proche de l'arête de coupe, figure (b). En fraisage, ces thermocouples sont utilisés principalement insérés dans la pièce usinée, proche de la zone de coupe.



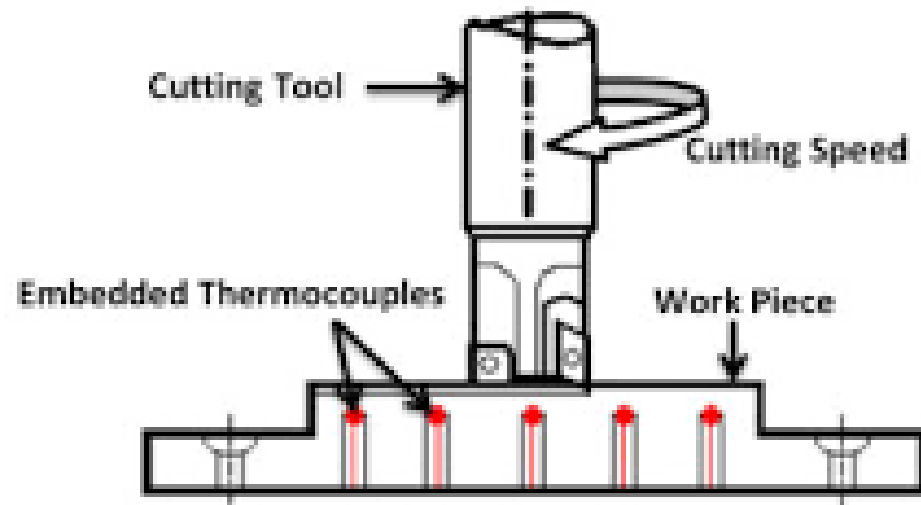
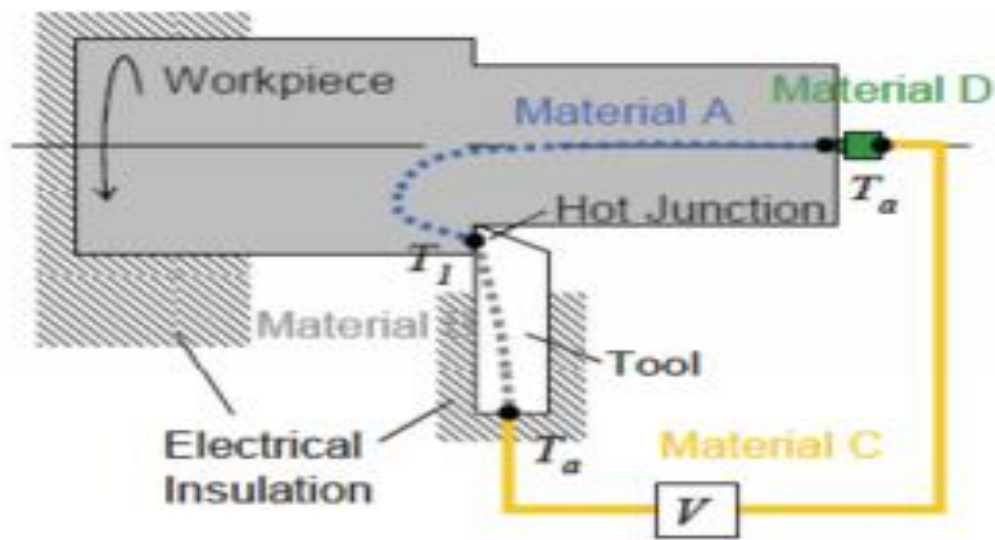


Figure 2: Embedded thermocouples used for milling temperature measurement [14]



Application du thermocouple dynamique au tournage [Davies 2007]

• Thermocouple dynamique

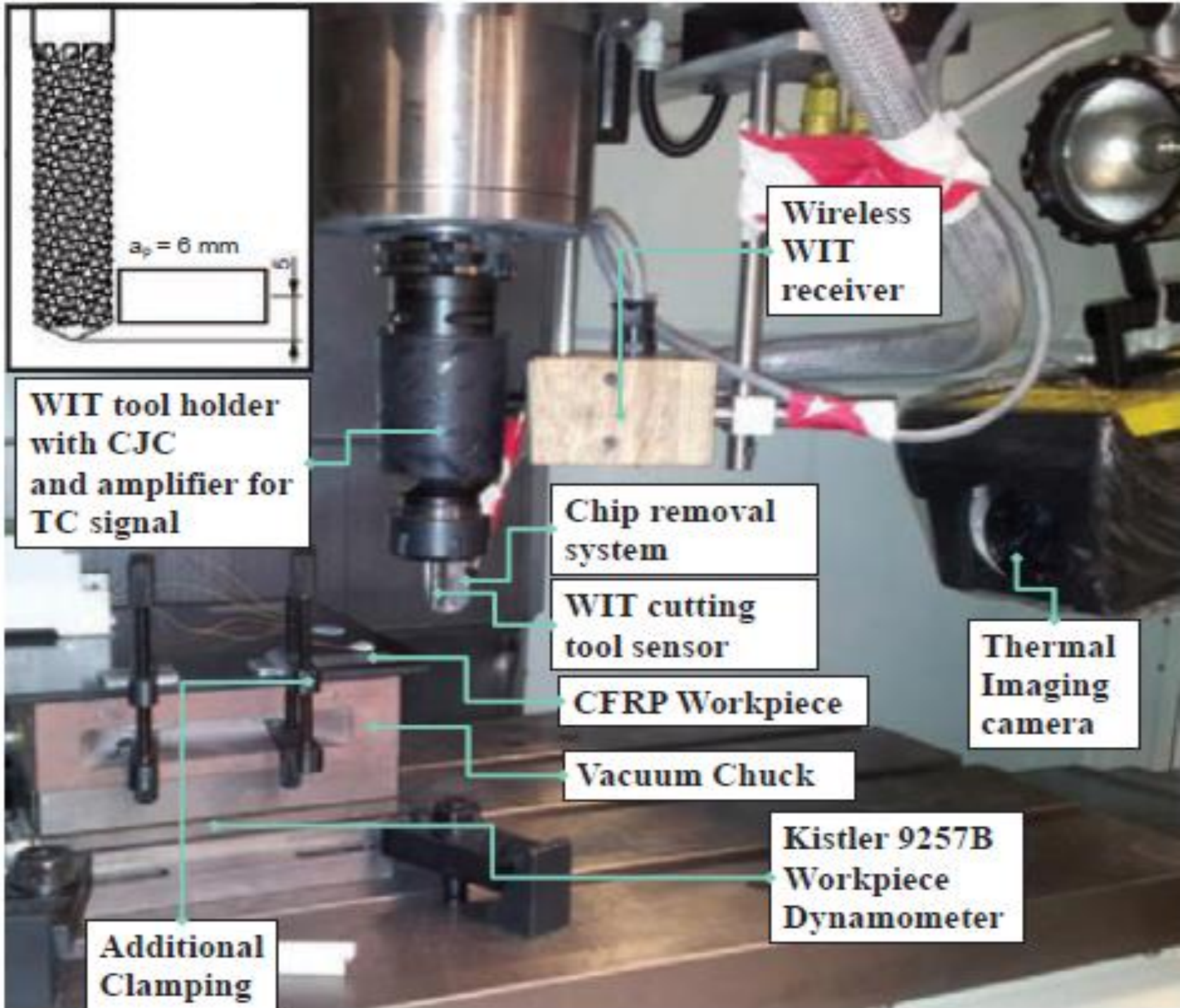
Le thermocouple peut également être réalisé par les composants participants à la coupe : outil et pièce. La liaison chaude du thermocouple est alors l'interface entre l'outil et la pièce. En fraisage, l'alternative est de réaliser un thermocouple entre la pièce et un fil métallique gainé. Lors de la coupe, le fil est coupé et il se crée une liaison chaude entre le fil et la pièce. Les composants du thermocouple n'étant pas normalisés, cette technique impose une calibration du couple créé.

Mesure de la température

- Thermographie infrarouge

La thermographie infrarouge est la discipline qui permet de mesurer à distance et sans contact la température d'un objet cible à partir de ses émissions d'infrarouges.

- La simple visualisation thermique, mais sans mesure de température, s'effectue au moyen d'un imageur thermique. La mesure à distance de la température s'effectue au moyen des appareils suivants :
- thermomètres infrarouges sans contact,
- caméras infrarouges de mesure thermique.





117

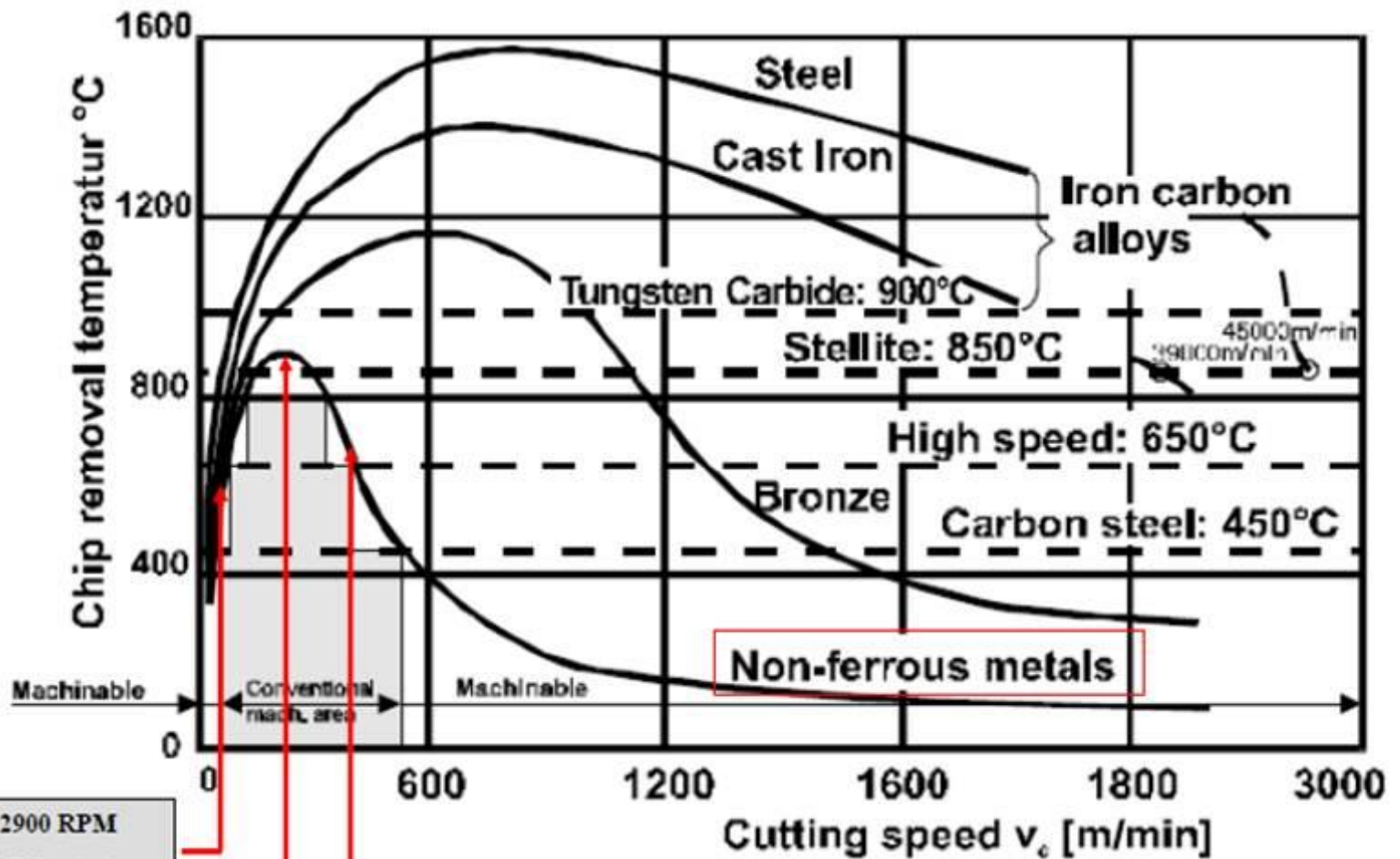


22.6

09:23

Chip Removal Temperature as a Function of Cutting Speed For Various Metals

(showing three cutting speeds used in Al 380 machining study)



Spindle Speed = 2900 RPM

Cutting Speed = 62.0 m/min

Spindle Speed = 10,000 RPM

Cutting Speed = 214 m/min

Spindle Speed = 18,000 RPM

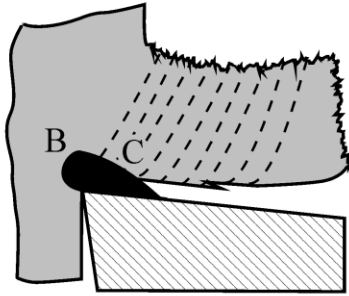
Cutting Speed = 386 m/min

Arête rapportée

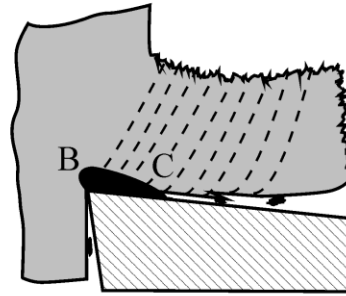
Sous certaines conditions, un frottement important entre l'outil et le copeau peut amener des portions de copeau à adhérer à l'outil. Il se forme, dans l'espace compris entre la pièce, l'outil et le copeau, un amas constitué par une certaine quantité de particules de métal qui adhèrent, plus ou moins fortement, à l'outil.

Arête rapportée

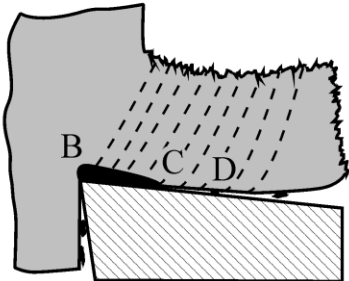
1



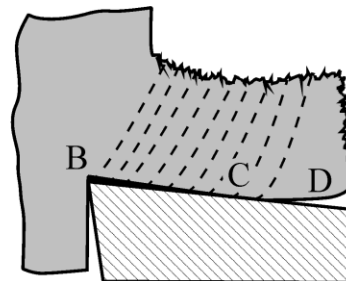
2



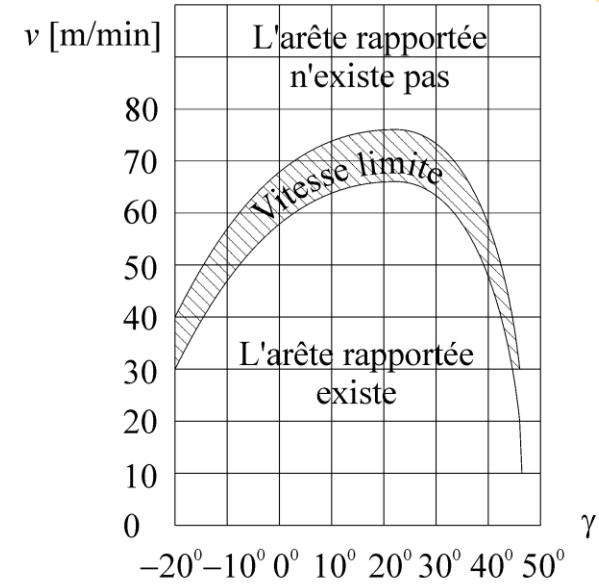
3



4



a) formation et transformation
d'une arête rapportée



b) conditions de
formation
d'une arête
rapportée

Arête rapportée

- Cet amas est appelé arête rapportée et parfois aussi copeau adhérent.
- Le sommet de cet amas se renouvelle constamment.
- L'arête rapportée est très dure et suffisamment résistante pour se substituer au tranchant de l'outil.
- Lorsque la vitesse de coupe ou d'avance augmente, l'outil s'échauffe et l'arête rapportée a tendance à se fluidifier et se fait emporter par le copeau.
- Elle existe donc uniquement dans certaines conditions favorables (température et forces de coupe) liées aux vitesses de coupe et d'avance.

Arête rapportée

- Une arête rapportée stable protège la face de coupe de l'outil en diminuant son usure. Cependant, la formation d'une arête rapportée est nuisible à la surface usinée.
- N'étant pas très stable, certaines de ses particules sont entraînés avec le copeau et d'autres collent à la surface usinée. Il s'en suit une détérioration de l'état de surface et une diminution de la précision dimensionnelle d'usinage.
- Elle peut éventuellement être tolérée dans le cas de l'usinage brut.