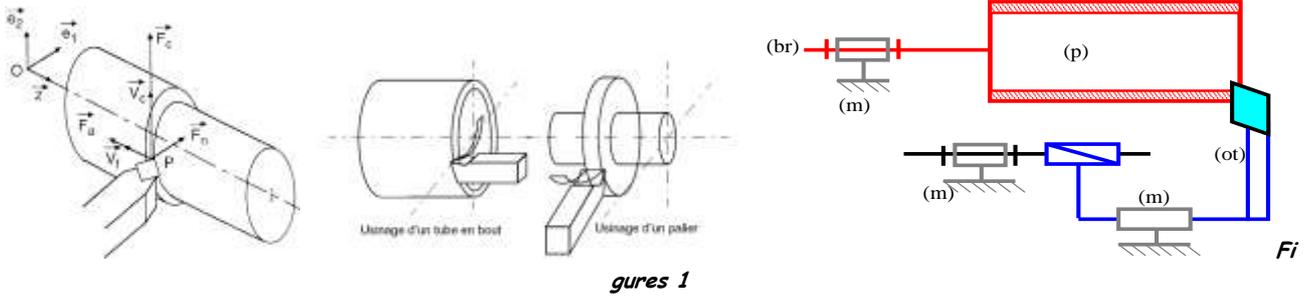

MESURE DES EFFORTS DE COUPE

I. Présentation	2
I.1. Puissance nécessaire à la coupe	2
I.1.a. Représentation des composantes de l'action de l'outil sur la pièce	2
I.1.b. Torseur cinématique	3
I.1.c. Puissance nécessaire à la coupe	3
I.1.d. Déformation du copeau (d'après nomenclature de Pomey)	4
I.1.e. Géométrie de l'outil	5
I.1.f. Vitesse de Coupe	5
I.2. Phénomènes de coupe	6
I.2.a. Discontinuité du copeau	6
I.2.b. Phénomènes thermiques	8
I.3. Force de coupe par unité de surface	9
I.3.a. Efforts de coupe	9
I.3.b. Définitions liées à l'outil : angles d'outil	9
I.3.c. Force de coupe / unité de surface : pression spécifique de coupe K_c	10
I.4. Facteurs influant sur la coupe en tournage	11
II. Mesure des efforts de coupe	12
II.1. Mesure lors d'essais de détermination de K_c.	12
II.2. Mesure avec pont de Wheatstone	12
II.2.a. Présentation	12
II.2.b. Mesure à une jauge	13
II.2.c. Montage à deux jauges	14
II.2.d. Montage à quatre jauges : compensation de la température	14
II.3. Détection de l'usure d'un outil en production.	15
II.3.a. Contrôle de l'usure d'outil (Sandvik Coromant)	16
II.3.b. Gestion totale d'outils en production.	16

I. Présentation



gures 1

Remarque : le tournage d'un tube à l'outil couteau permet de passer de trois à deux dimensions pas de F_p (coupe orthogonale=simplification du problème).

I.1. Puissance nécessaire à la coupe

I.1.a. Représentation des composantes de l'action de l'outil sur la pièce

Moyennant l'hypothèse d'un contact ponctuel entre outil et pièce, l'action exercée par l'outil sur la pièce peut être représentée par un torseur. En décomposant la résultante dans un repère lié à la machine, on obtient :

$$\{T_{Outil \rightarrow Pièce}\}_D = \begin{Bmatrix} -F_p & 0 \\ -F_c & 0 \\ -F_f & 0 \end{Bmatrix}_{D, x_m, y_m, z_m}$$

Les valeurs de ces composantes dépendent logiquement du matériau usiné et de la section du copeau usiné (produit de l'avance et de la profondeur de coupe), mais aussi des angles de coupe de l'outil, de l'épaisseur du copeau, du rayon de bec, du degré d'usure de l'outil.

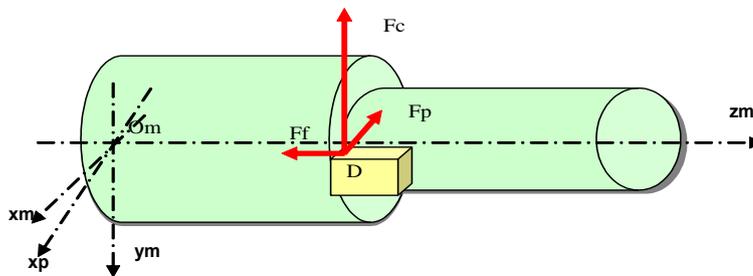


Figure 2 : Mise en évidence des efforts de coupe, d'avance et de pénétration

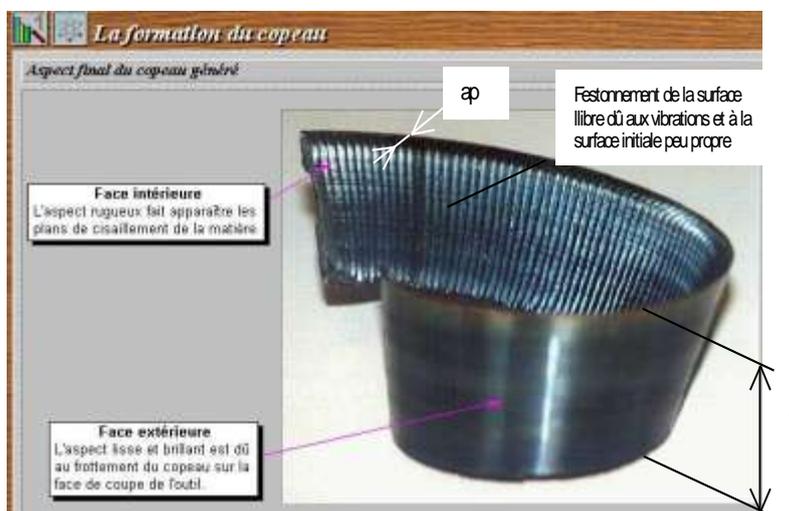


Figure 3

I.1.b. Torseur cinématique

Le mouvement relatif de la pièce par rapport à l'outil est caractérisé par son torseur cinématique :

$$\{C_{pièce/outil}\}_D = \left\{ \begin{array}{l} 0 \quad 0 \\ 0; V_c \\ \Omega \quad V_f \end{array} \right\}_{D_{xm,ym,zm}} .$$

Ces grandeurs sont liées à celles que vous affichez sur la machine. Elles sont respectivement : V_c (Vitesse de coupe), N (fréquence de rotation), f (avance par tour) et V_f (avance par minute).

👉 *Retrouver ces grandeurs en USI puis avec les unités usuelles.*

I.1.c. Puissance nécessaire à la coupe

👉 *Appliquer le théorème de l'énergie-puissance à l'ensemble {broche,vis,outil, pièce} afin d'identifier les termes et de faire les hypothèses éventuelles.*

La puissance consommée par la coupe est la puissance des interefforts entre l'outil et la pièce.

En chariotage, elle vaut :

$$P_{outil \leftrightarrow pièce} = \left\{ T_{outil \rightarrow pièce} \right\} \cdot \left\{ C_{pièce / outil} \right\} = -F_c \cdot V_c - F_f \cdot V_f$$

Le signe - indique la résistance qu'offre l'outil au mouvement. Moyennant le rendement du moteur, on en déduit la puissance nécessaire du (des) moteurs.

Dans la pratique $F_f \ll F_c$ et $V_f < V_c$. $F_f \cdot V_f$ est donc négligeable.

👉 *Expliquer ce qu'il se passe en dressage lorsque la pointe de l'outil s'approche du centre.*

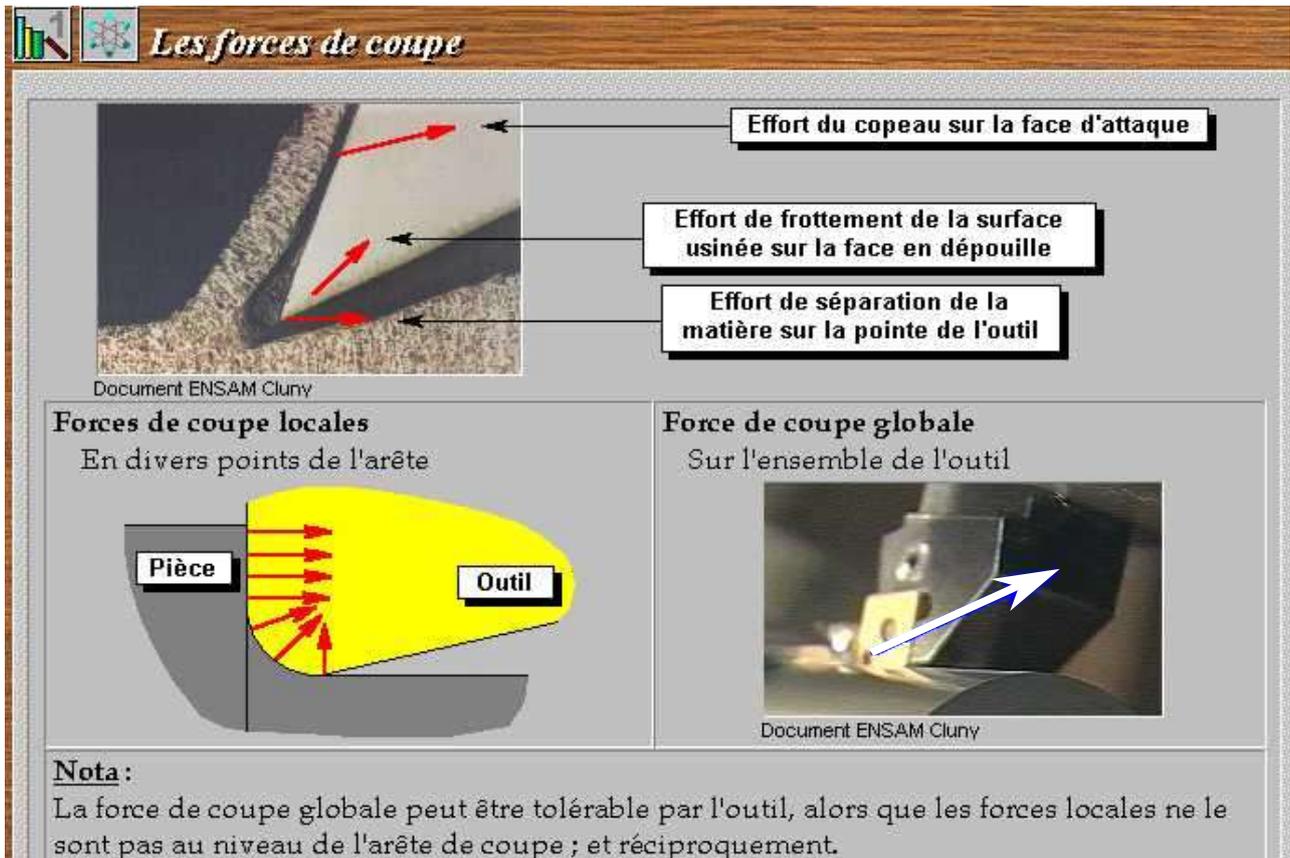


Figure 4 : Les différentes forces de coupe (d'après CDCoupe)

I.1.d. Déformation du copeau (d'après nomenclature de Pomey)

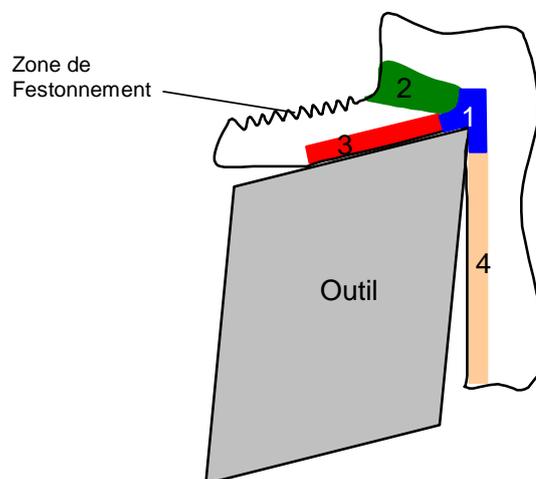


Figure 5

- 1 Séparation du métal en deux : copeau-surface usinée (sur laquelle subsiste le copeau adhérent ou rapporté)
- 2 Zone de formation du copeau
- 3 Zone de glissement face de coupe/copeau
- 4 Zone de glissement (peu intense) face en dépouille/copeau

I.1.e. Géométrie de l'outil

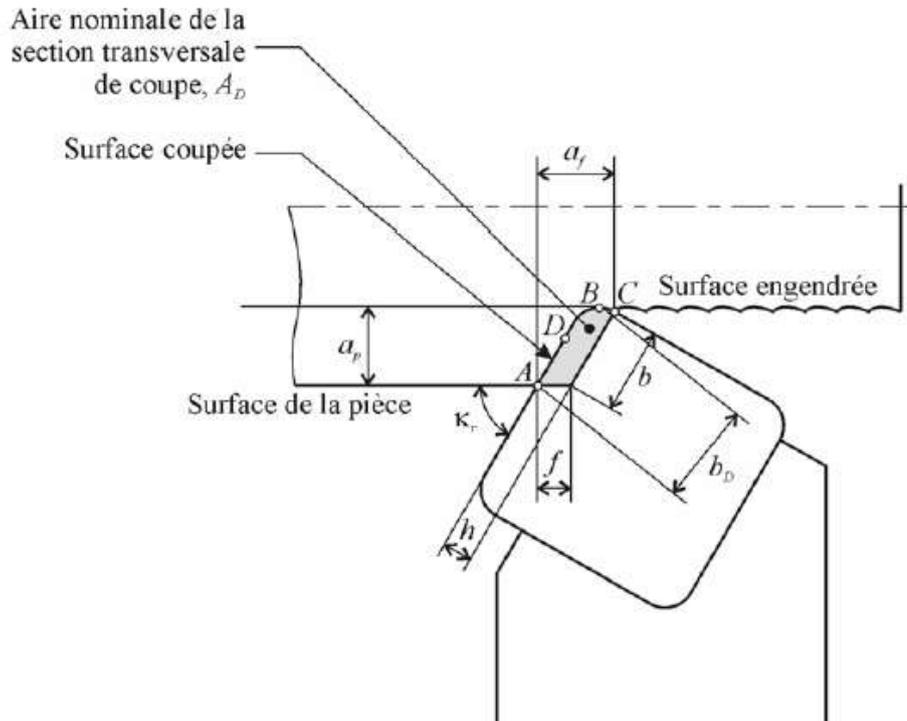


Figure 6

AD : aire de la section de coupe, a_p : profondeur de coupe, a_f : engagement de l'arête, f : avance par tour, h : épaisseur de coupe, b : largeur de coupe, b_D : largeur nominale de coupe, K_r : angle de direction d'arête, D : point principal de l'arête.

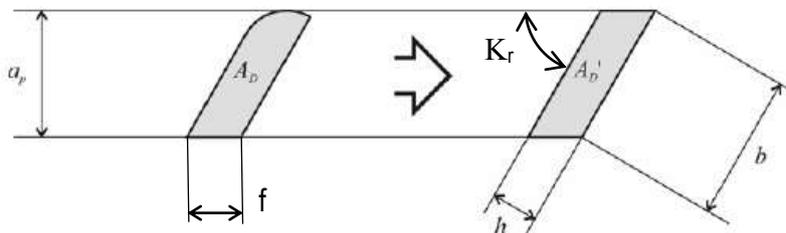


Figure 7 : simplification de la forme du copeau

En simplifiant on admet que : $A_D = b \cdot h = a_p \cdot f$

I.1.f. Vitesse de Coupe

Il est aujourd'hui possible d'usiner des pièces mécaniques sur de larges plages de vitesses de coupe. Selon le matériau utilisé, ces plages varient, mais il est toujours possible de distinguer **trois zones de vitesses de coupe distinctes** :

- vitesses de coupe de l'"Usinage Conventionnel"
- vitesses de coupe inexploitable (conditions de coupe dégradées)
- vitesses de coupe correspondant à l'"Usinage Grande Vitesse"

Par exemple, lors d'usinage d'acier à des vitesses de coupe de 30 à 200m/min, on parle d'usinage conventionnel, alors que des vitesses de coupe de 500 à 2000m/min correspondent au domaine de l'UGV.

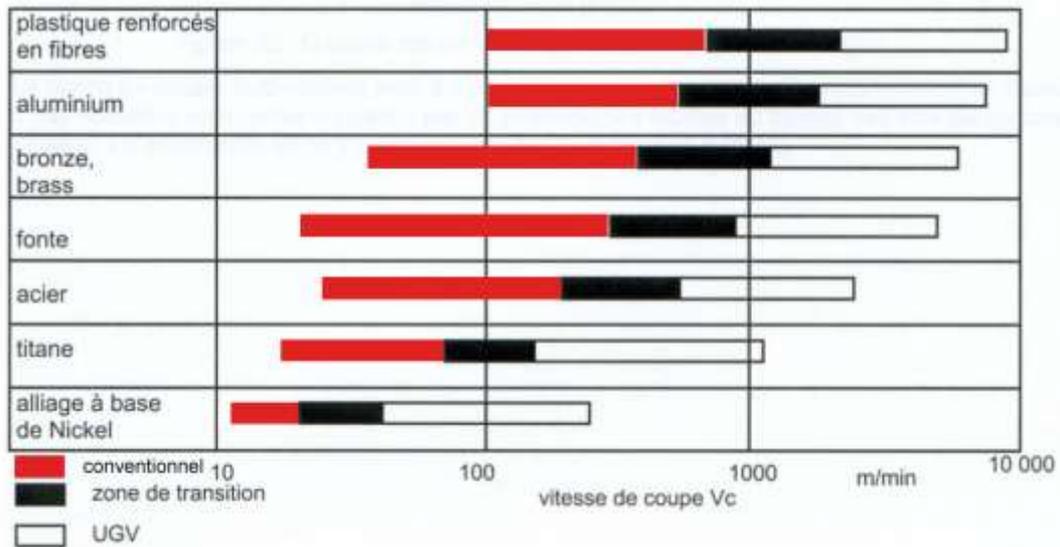


Figure 8 : Plages de vitesses de coupe pour différents matériaux

En augmentant V_c au delà des limites de vitesse de l'usinage conventionnel, on commence par traverser une zone de vitesses inexploitable appelée « Vallée de la mort » dans laquelle les conditions de coupe sont dégradées (usure rapide de l'outil, mauvais état de surface...), puis on arrive dans le domaine de l'UGV où les conditions de coupe sont excellentes. La limite entre les zones est arbitraire.

I.2. Phénomènes de coupe

I.2.a. Discontinuité du copeau

L'image ci-dessous montre le résultat d'un test courant appelé "Quick Stop Test" (la pointe de l'outil est retirée brutalement par un système explosif), qui permet d'étudier un copeau en cours de formation pour trois vitesses de coupe différentes.

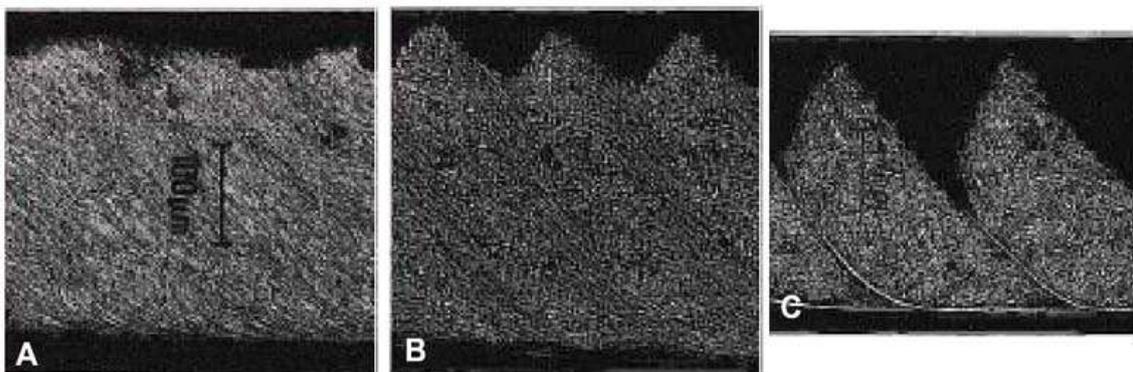


Figure 9 : Evolution des copeaux suivant la vitesse de coupe (A: copeau continu B: copeau segmenté C: copeau dentelé)-la zone de festonnement apparaît clairement

Pour les métaux, le processus de formation du copeau est principalement basé sur des déformations plastiques. En faible vitesse de coupe, le copeau est continu, et les déformations plastiques dans les zones de cisaillement sont quasi-stationnaires (Copeau A et figure ci-dessous).

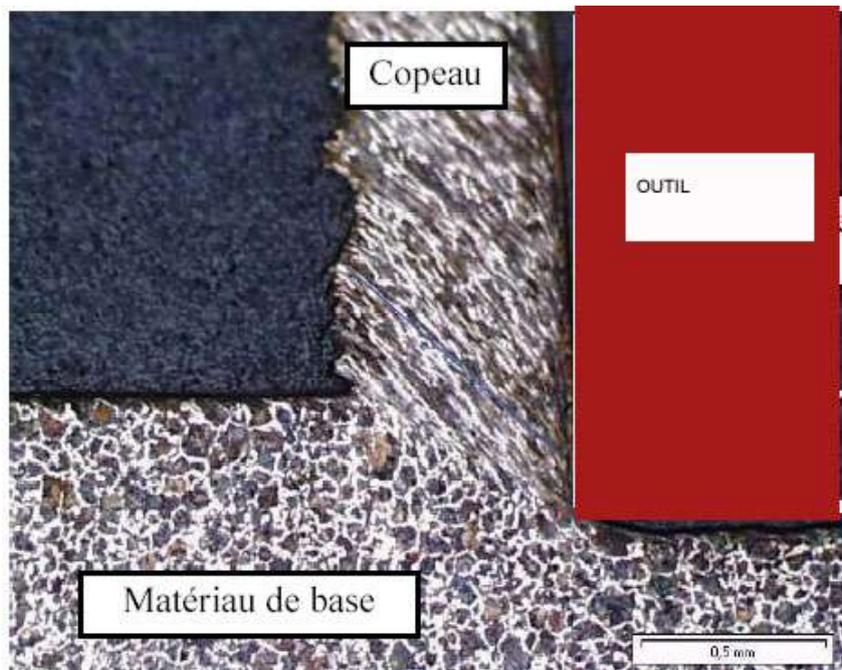


Figure 10 Formation du copeau en usinage Conventionnel

Avec de hautes vitesses de coupe, le copeau est dentelé et formé d'éléments séparés (C), ce qui semble être généré par une rupture du matériau plus que par un cisaillement. En UGV, des fragments de copeaux se détachent par la propagation de fissures, comme l'illustrent les figures ci-dessous.

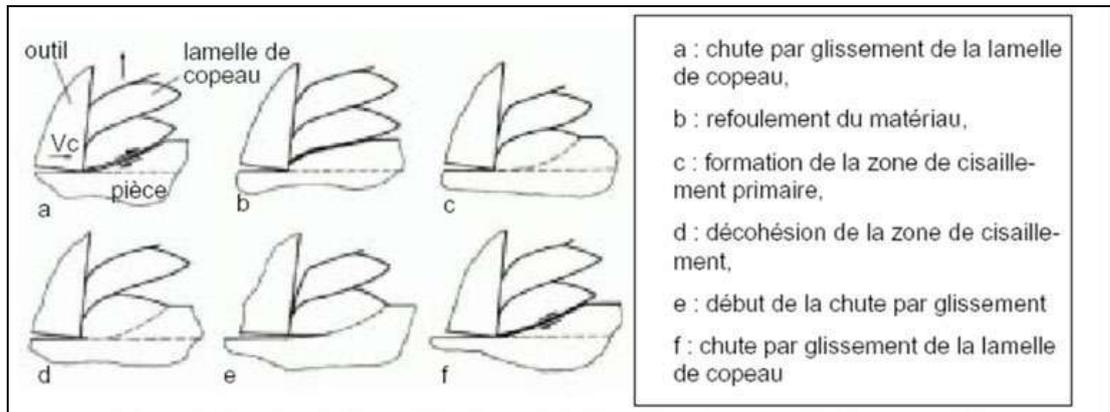


Figure 11 Représentation schématique de la formation d'une lamelle de copeau

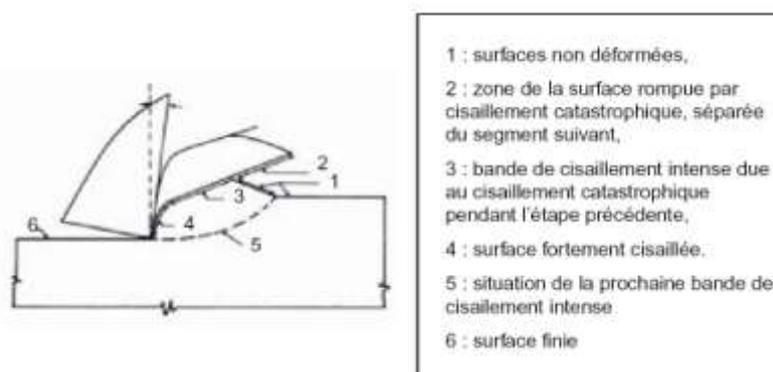


Figure 12 Détail de la formation du copeau en UGV

I.2.b. Phénomènes thermiques

Les sollicitations thermiques sont générées lors de la coupe par l'auto-échauffement au sein du matériau de la pièce et par les frottements à l'interface outil/pièce.

En usinage conventionnel, l'énergie calorifique s'évacue dans les copeaux mais également dans la pièce et l'outil dans des proportions non négligeables. Ainsi, le matériau subit un traitement thermique local (trempe superficielle) qui modifie les caractéristiques de la pièce finie.

En UGV, la nature de la formation du copeau est différente et l'énergie de la coupe s'évacue à plus de 80% dans les copeaux. Bien que des énergies plus importantes soient mises en jeu, les échanges thermiques entre le copeau et la pièce n'ont plus le temps d'avoir lieu : celle-ci reste pratiquement à température ambiante.

Cette dissipation de l'énergie de coupe a une influence sur la température de l'outil. Une simulation thermique de la coupe montre la formation d'un point chaud en Usinage Conventionnel et en UGV situé à la pointe de l'outil.

La température de ce point varie de 500°C en Usinage Conventionnel à 1000 °C en UGV.

Il est possible d'observer sur la figure ci-dessous la carte thermique d'un outil pour différentes vitesses de coupe (100m/min en haut à droite, 500m/min en bas à droite). La localisation du point chaud pour des conditions de coupe correspondant à l'UGV est indiquée.

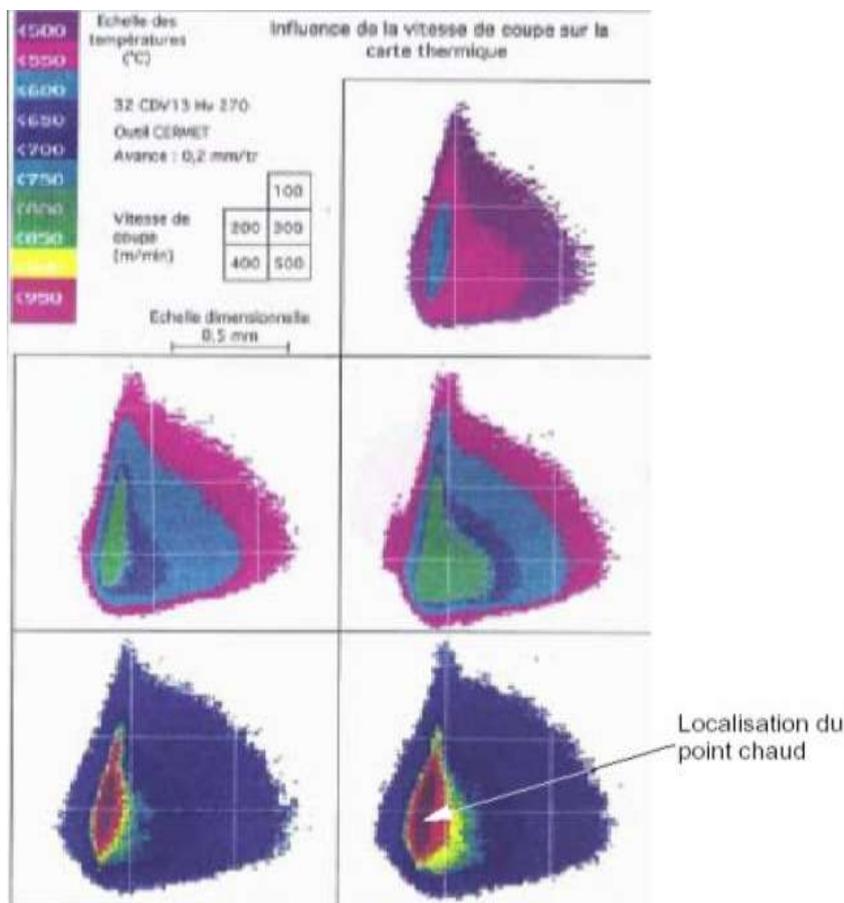


Figure 13 Carte thermique d'un outil pour différentes vitesses de coupe

I.3. Force de coupe par unité de surface

I.3.a. Efforts de coupe

Les efforts de coupe sont à l'origine des déformations plastiques et donc des élévations de température qui se produisent au cours de la coupe. Pour toutes autres conditions de coupe égales, l'augmentation de la vitesse de coupe ne s'accompagne pas d'une variation notable des efforts de coupe (10% de baisse environ), alors que l'augmentation de la vitesse d'avance entraîne une augmentation de la valeur de l'effort tangentiel F_f (relation linéaire : l'effort double environ quand la vitesse d'avance double).

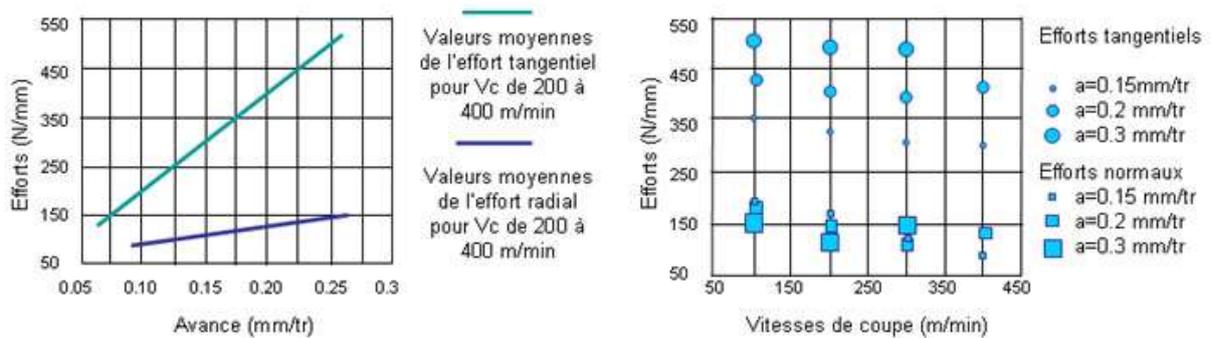


Figure 14 : Efforts de coupe (N/mm de profondeur de passe) fonction de l'avance et de la vitesse de coupe

I.3.b. Définitions liées à l'outil : angles d'outil

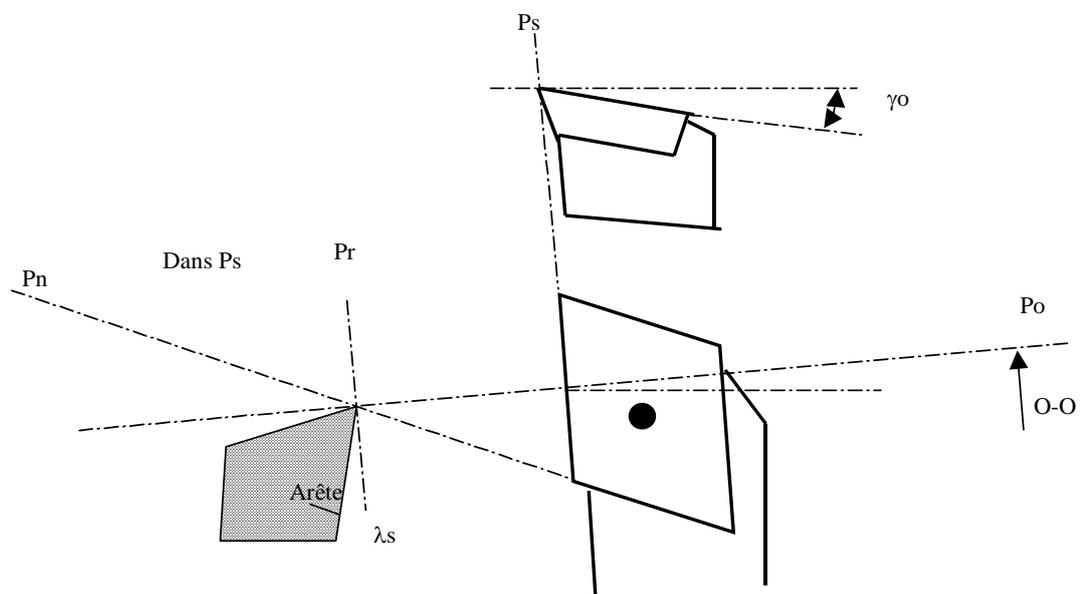


Figure 15

I.3.c. Force de coupe / unité de surface : pression spécifique de coupe K_c

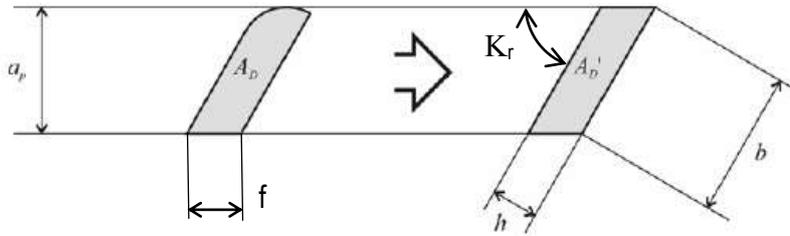


Figure 16 : simplification de la forme du copeau

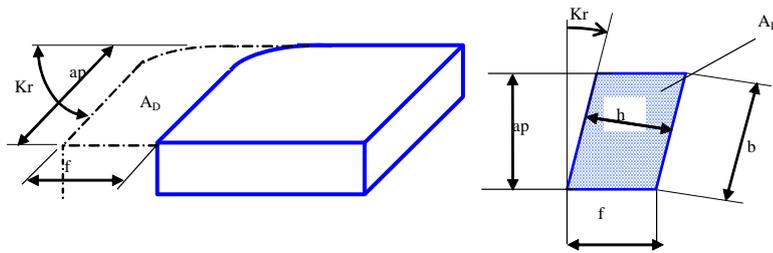


Figure 17

La force de coupe par unité de surface de coupe est le rapport de la force de coupe F_c exercée par la partie active de l'outil à l'aire nominale de la section transversale de coupe A_D .

$$K_c = \frac{F_c}{A_D} = \frac{F_c}{a_p \cdot f} \Rightarrow F_c = K_c A_D = K_c \cdot a_p \cdot f$$

K_c est la force nécessaire en newtons pour couper 1 mm^2 et s'exprime donc en N/mm^2

On peut remarquer que la force de coupe est fonction de l'avance par tour f , de la profondeur de passe a_p , mais aussi de la pression spécifique de coupe K_c . Elle est indépendante de la vitesse de coupe dès que la vitesse est suffisante (on quitte la zone dans laquelle il y a risque de création d'une arête rapportée qui modifie les caractéristiques géométriques de l'outil).

Cette pression spécifique de coupe K_c n'est pas une constante. Elle augmente notamment quand l'angle de coupe diminue.

$$K_c = C \cdot h^n \cdot (1 - m \cdot \theta)$$

Avec $h = f \cdot \sin(Kr)$: épaisseur du copeau

m et n deux caractéristiques dépendant du couple matériau pièce- matériau outil

C dépendant du matériau de la pièce

$\theta = \gamma_0 - \gamma_{ref}$ respectivement angles de coupe orthogonal et de référence (pour l'essai).

Valeurs de n et m

Matériau pièce	n	m
Aciers	-0.2	0.008
Métaux non ferreux	-0.5	0.01
Fontes	-0.3	0.01

Valeurs de C

Matière		R(N/mm ²)	C(N/mm ²)
Aciers à usinabilité amélioré	Au Mn S	350-500	1050
		600-800	1300
Aciers au Carbone	C < 0.25%	450-600	1850
	C < 0.45%	600-750	2150
	C < 0.65%	750-950	2600
	C < 0.90%	950-1150	2800
Aciers alliés	Cr-Mo	600-750	1650
	Ni-Cr	750-950	2300
Bronzes		400-700	640
Fontes GL	Ferritiques	190-220	1250
	Perlitiques	220-260	1420
Alliages alu	Si-Mg	<300	460

Ces valeurs permettent de déterminer Kc. Elles ont été obtenues à partir d'essais de mesurage des composantes de l'effort de coupe.

Lors de ces essais, un porte-outil équipé de jauges de déformations est utilisé.

I.4. Facteurs influant sur la coupe en tournage

L'angle de coupe Kr. Il influence la pression par unité de surface. Il détermine la longueur effective d'arête engagée dans la matière donc l'épaisseur du copeau. En finition il est variable car il est formé par le rayon du bec de l'outil. La formation du copeau est meilleure avec un grand angle de coupe car le copeau hélicoïdal est dirigé dans la direction opposée à la zone de coupe.

L'état de surface. Il dépend du rapport entre l'avance et le rayon du bec de la plaquette, également de l'usure de l'outil et de la vitesse de coupe. Un grand rayon de bec supérieur ou égal à la profondeur de passe répartit la pression sur une plus grande longueur pour produire un meilleur état de surface, cependant le contrôle du copeau n'est pas idéal. Cette solution demande plus de puissance, les forces de coupe radiales sont plus élevées, par conséquent des vibrations peuvent apparaître.

Vibrations. Elles apparaissent quand la possibilité de mouvement dans le montage sur la machine est possible, les forces de coupe déséquilibrent le montage. Les vibrations peuvent être réduites en utilisant un rayon de bec plus petit, une arête de coupe plus vive, un plus grand angle de coupe

Rayon du bec. Un petit rayon de bec d'outil affecte la précision dimensionnelle, l'usure de l'outil aura une plus forte influence sur la position de l'arête. Un grand rayon requiert plus de puissance, génère des vibrations. La profondeur de coupe doit être supérieure ou égale à un tiers du rayon du bec ; 0,2 mm est un minimum.

II. Mesure des efforts de coupe

II.1. Mesure lors d'essais de détermination de K_c .

On utilise un porte outil dynamométrique équipé de jauges de déformation.

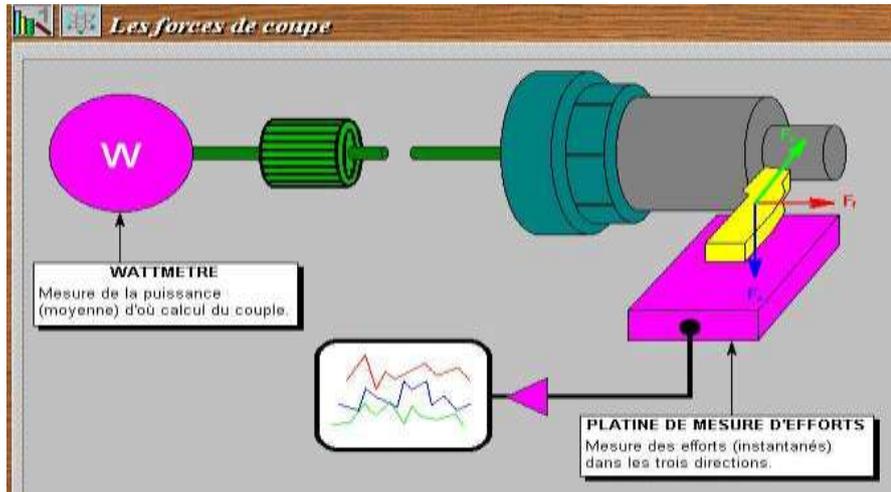


Figure 18

Dans la plupart des cas on ne mesure que F_c et F_f en usinant un tube de faible épaisseur. Ceci évite de fausser les résultats avec des rayons de bec différents. De plus, afin de fixer un paramètre, on prend fréquemment $K_r=90$; la coupe est alors dite orthogonale.

En effet le rayon de bec influence sur l'épaisseur du copeau et de fait sur K_c ; On constate ceci avec une plaquette ronde mais en règle générale on peut dire que quand R_ϵ augmente, h diminue et de ce fait K_c augmente donc F_c .

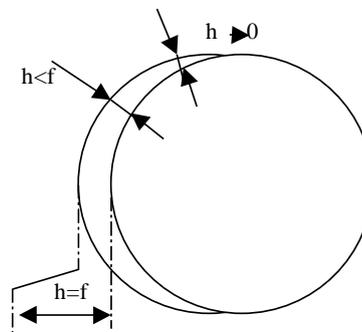


Figure 19 : évolution de l'épaisseur du copeau avec une plaquette ronde

II.2. Mesure avec pont de Wheatstone

II.2.a. Présentation

Dans ce qui suit, on expose la mesure de F_c , mais ceci s'applique aussi à F_f .

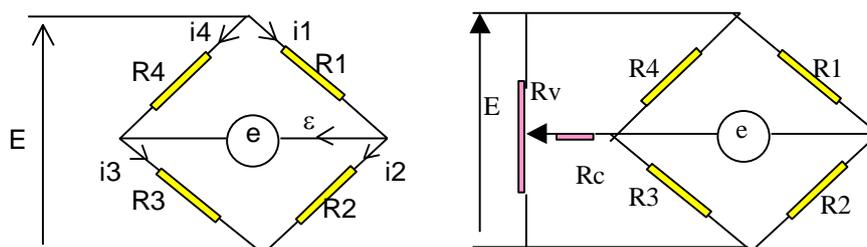


Figure 20 : Pont d'extensométrie avec circuit externe d'équilibrage à zéro

$$\begin{cases} i_2 = i_1 - \varepsilon \\ E = R_2 \cdot i_2 + R_1 \cdot i_1 \\ i_4 + \varepsilon = i_3 \\ E = R_1 \cdot i_1 + R_2 \cdot i_2 \\ e = R_1 \cdot i_1 - R_4 \cdot i_4 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} E = R_2(i_1 - \varepsilon) + R_1 \cdot i_1 \\ E = R_3(i_4 + \varepsilon) + R_4 \cdot i_4 \\ e = R_1 \cdot i_1 - R_4 \cdot i_4 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} i_1 = \frac{E + R_2 \varepsilon}{R_1 + R_2} \\ i_4 = \frac{E - R_3 \varepsilon}{R_3 + R_4} \\ e = R_1 \cdot i_1 - R_4 \cdot i_4 \end{cases}$$

$$\Rightarrow e = R_1 \frac{E + R_2 \varepsilon}{R_1 + R_2} - R_4 \frac{E - R_3 \varepsilon}{R_3 + R_4} \cong E \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right)$$

Modifions les valeurs des Ri de ΔR_i

$$e = E \cdot \left[\frac{(R_1 + \Delta R_1)}{(R_1 + \Delta R_1) + (R_2 + \Delta R_2)} - \frac{(R_4 + \Delta R_4)}{(R_3 + \Delta R_3) + (R_4 + \Delta R_4)} \right]$$

II.2.b. Mesure à une jauge

On place sur le porte outil une jauge de déformation de résistance R variable telle que : $\frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta L}{L}$. Les trois autres résistances sont fixes : $R_2=R_3=R_4=R$.

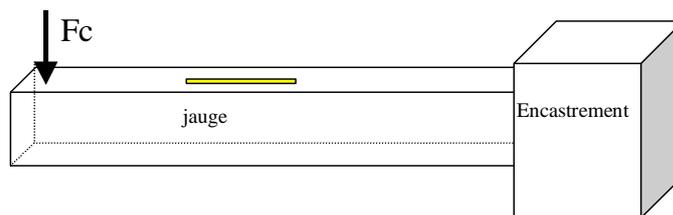


Figure 21

Fc est proportionnel à $\Delta R/R$

Il suffit d'étalonner le banc de mesure (offset) puis de mesurer $\Delta R/R$ pour trouver Fc.

La mesure de $\Delta R/R$ est obtenue d'après la mesure de e dans le pont de d'extensométrie.

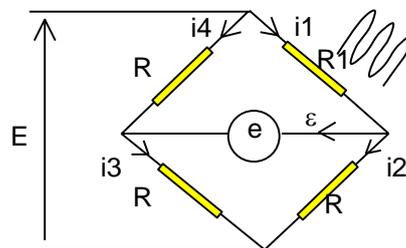


Figure 22 : Pont d'extensométrie avec une jauge

$$\Rightarrow e \cong E \left(\frac{R_1}{R_1 + R} - \frac{R}{R + R} \right) = E \left(\frac{R + \Delta R}{2R + \Delta R} - \frac{1}{2} \right) = E \left(\frac{2(R + \Delta R)}{2(2R + \Delta R)} - \frac{2R + \Delta R}{2(2R + \Delta R)} \right)$$

$$\Rightarrow e = \frac{E \cdot \Delta R}{2(2R + \Delta R)}$$

Si R_1 est la jauge active qui varie d'une résistance ΔR_1 , les autres étant identiques, on obtient

$$e = E \cdot \left[\frac{R_1 + \Delta R_1}{2R_1 + \Delta R_1} - \frac{1}{2} \right] = E \frac{\Delta R_1 / R_1}{4 + 2 \cdot \Delta R_1 / R_1} = E \frac{K \cdot \Delta L / L}{4 + 2 \cdot k \cdot \Delta L / L}$$

Avec K : facteur de jauge (voir cours jauges de déformations)

Ce type de montage est appelé montage en quart de pont, il a l'inconvénient de ne pas compenser la dérive en T° de la jauge.

II.2.c. Montage à deux jauges

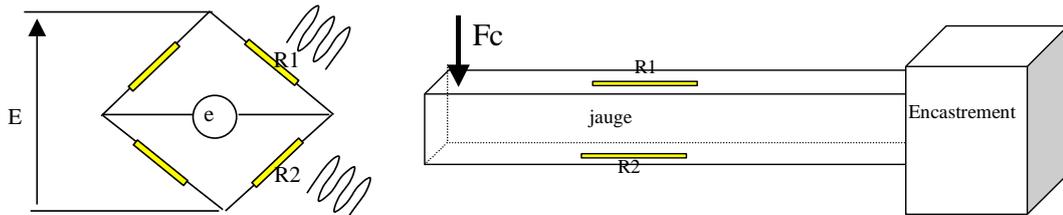


Figure 23 : Montage en demi-pont

Deux jauges axiales identiques sont utilisées. La jauge inférieure se situe précisément au-dessous de la jauge supérieure. Elles mesurent les déformations de flexion qui sont de même grandeur et de signes opposés. Toutes variations de résistance des jauges actives résultant de déformations de signe semblable générées par les charges axiales seront annulées du fait que les deux jauges actives se situent dans les bras adjacents du pont de Wheatstone. De même, les variations de résistance d'origine thermique (dilatation de l'éprouvette) seront annulées. De plus, les déformations produites par les charges en flexion étant de même grandeur mais de signe opposé, le signal de sortie du pont est linéaire et nominalement le double de celui produit par une seule jauge active.

II.2.d. Montage à quatre jauges : compensation de la température

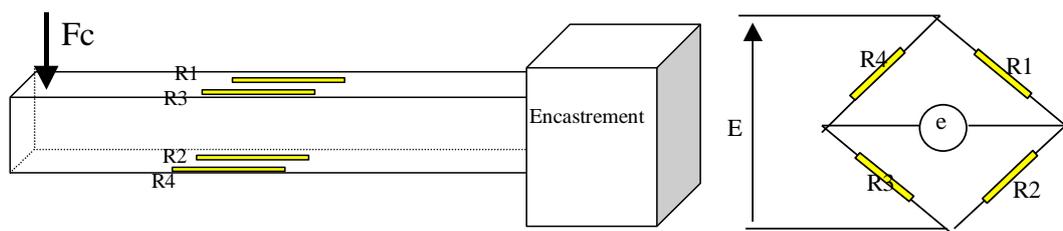


Figure 24 : Montage en pont complet

Cette version à quatre jauges identiques est la configuration de la poutre en flexion qui est la plus courante. La sortie linéaire du pont est deux fois celle de la version précédente en demi pont. On notera que les deux jauges situées sur la face supérieure se situent dans des bras opposés du pont de Wheatstone, de même que les jauges situées sur la face inférieure.

R_1 et R_3 sur le dessus du porte-outil sont sollicités en traction tandis que R_2 et R_4 sont sollicités en compression.

$$\text{On a donc : } \Delta R_1 = \Delta R_3 = -\Delta R_2 = -\Delta R_4 .$$

$$\Rightarrow e \cong E \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) = E \left(\frac{R + \Delta R}{R + \Delta R + R - \Delta R} - \frac{R - \Delta R}{R + \Delta R + R - \Delta R} \right)$$

$$\Rightarrow e \cong E \left(\frac{R + \Delta R - R + \Delta R}{3R} \right) = E \frac{\Delta R}{R} \text{ soit : } e = E.K \frac{\Delta L}{L}$$

La tension mesurée sur le galvanomètre est directement proportionnel à la force F exercée sur le porte-outil.

II.3. Détection de l'usure d'un outil en production.

Le processus d'usinage a toujours nécessité une **surveillance** qui dans le passé, relevait de la responsabilité de l'opérateur. Avec l'utilisation de systèmes de production entièrement automatisés, il s'est avéré indispensable de développer des systèmes de contrôle du processus d'usinage eux aussi entièrement automatiques.

On surveille le processus d'usinage afin de supprimer les rebuts dus aux ruptures d'outils en cours d'usinage et d'optimiser la durée de vie des outils de coupe.

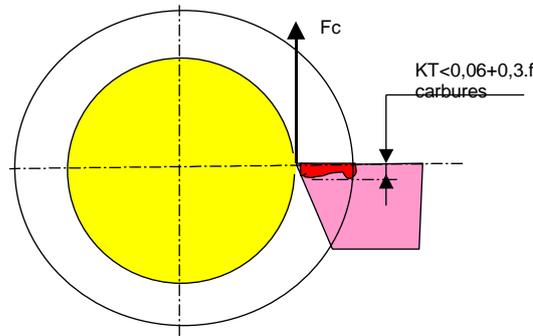


Figure 25

Pour une surveillance efficace, il est important que **les signaux observés varient en fonction de l'usure de l'outil** et non pas seulement lorsque l'outil se casse.

La force de coupe F_c varie en fonction du stade d'usure de l'outil. L'augmentation de la force d'avance F_f est encore plus importante proportionnellement. Ceci permet de régler de façon plus précise les seuils d'alarme déclenchant les signaux.

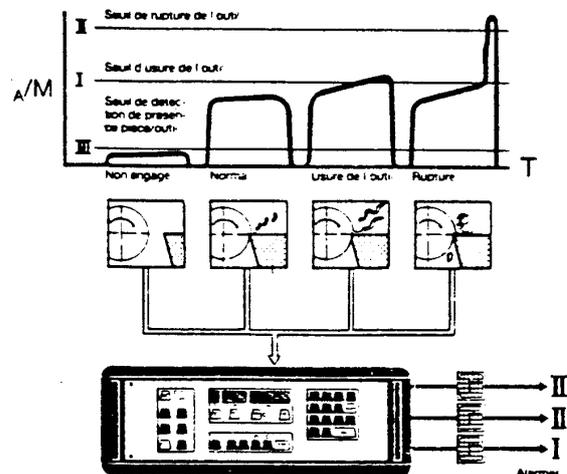


Figure 26

II.3.a. Contrôle de l'usure d'outil (Sandvik Coromant)

Le système contrôle en permanence les seuils d'alarme suivants :

- Le seuil I détermine la valeur limite d'usure de l'outil. Ce signal pourra être utilisé pour commander un changement d'outil à la fin de l'opération en cours.
- Le seuil II détermine le seuil de rupture de l'outil. Ce signal d'alarme doit être utilisé pour stopper immédiatement la machine.
- Le seuil III signale le non engagement de l'outil dans une opération pouvant être du a l'absence de l'outil ou de la pièce à usiner.
- Le seuil IV permet de détecter les collisions. Comme le seuil II, il doit stopper immédiatement la machine.

II.3.b. Gestion totale d'outils en production.

Il existe deux types principaux de capteurs mesurant la variation de F_c :

Les capteurs de force : Ce sont des extensomètres piézo-électriques ou du type jauges de contraintes,

Ils se montent directement sur la vis d'avance ou sous la tourelle porte-outil.

Ils surveillent directement l'évolution de la force d'avance F_f .

Les capteurs de courant : Lorsque l'outil s'use ou casse, le courant consommé augmente.

Le capteur de courant se monte sur le câble d'alimentation du moteur d'avance et détecte les variations de courant. Il est également possible de surveiller le moteur de broche. Dans ce cas, le capteur de courant surveille l'évolution du couple exercé par la force de coupe F_c .

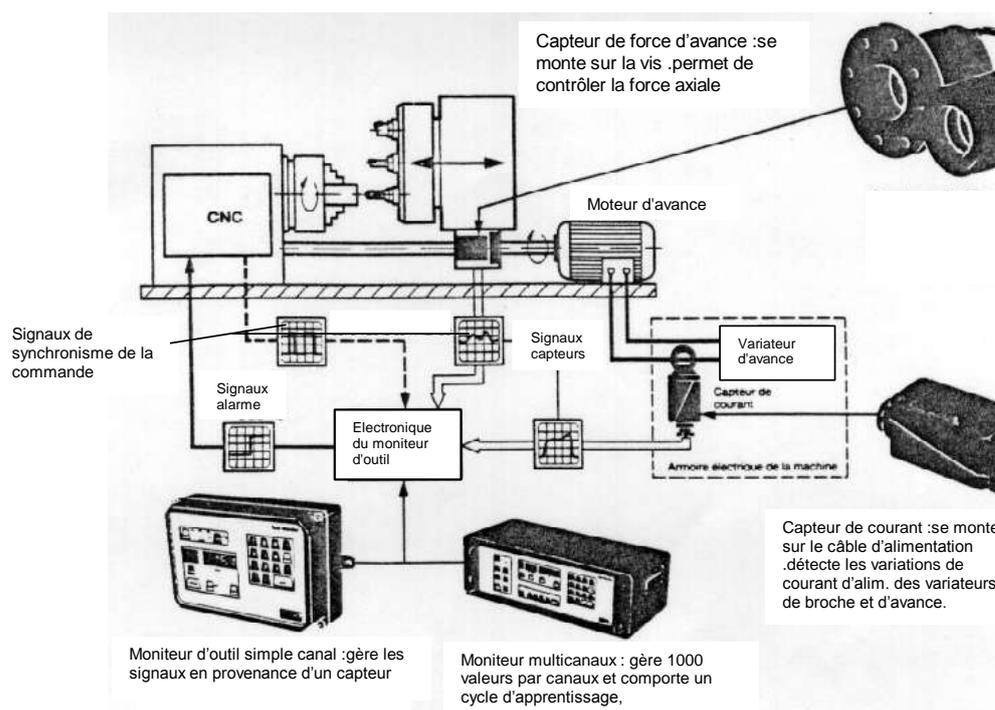


Figure 27