

ÉTUDE DES SYSTÈMES MÉCANIQUES ANALYSER – CONCEVOIR – RÉALISER

RÉALISER – CHAPITRE 3 PROCÉDÉS D'USINAGE

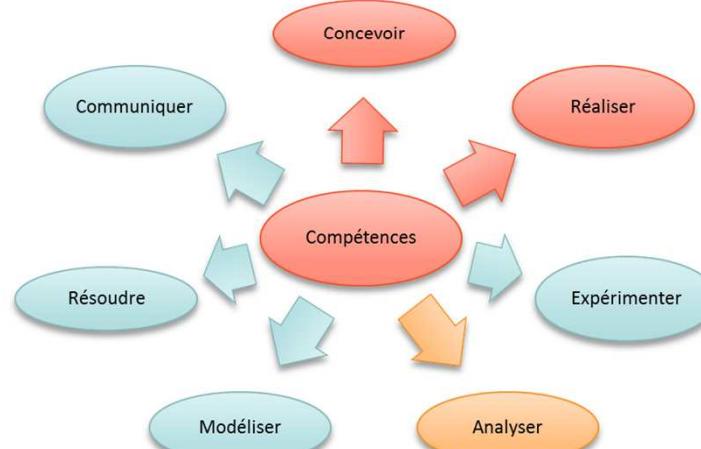


Tour à bois

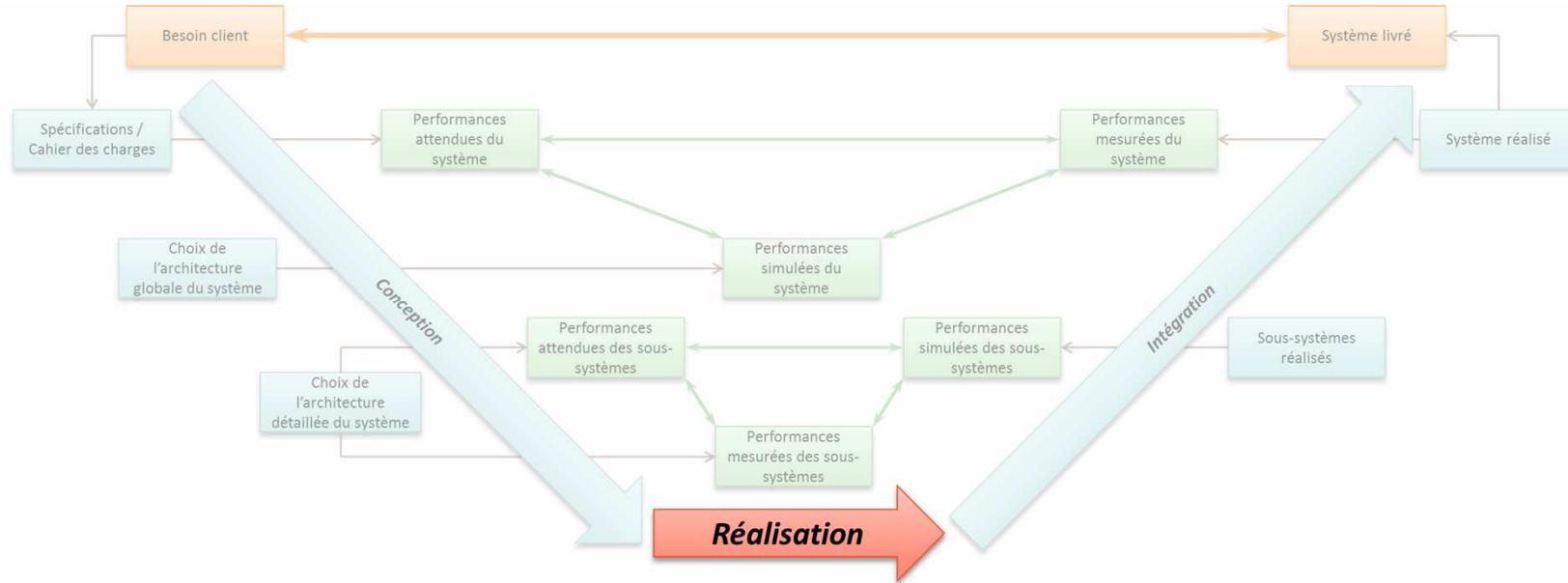
Fraises de dentiste

Polissage d'un moule

Taille d'un engrenage à la fraise mère



Xavier Pessoles - Jean-Pierre Pupier

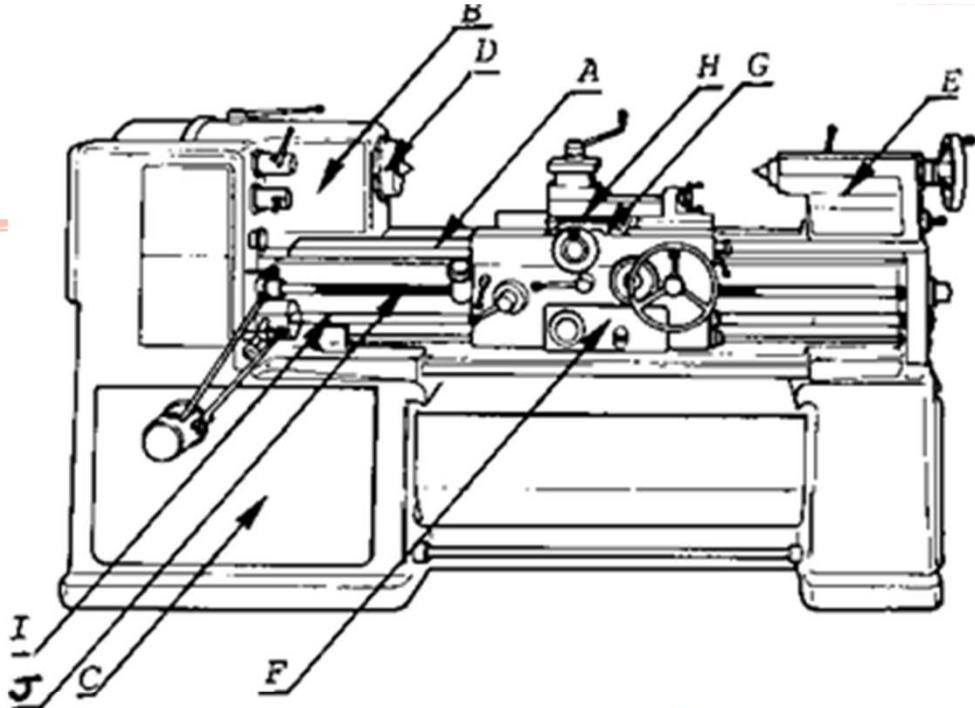


2

INTRODUCTION

TYPOLOGIE DE MACHINES

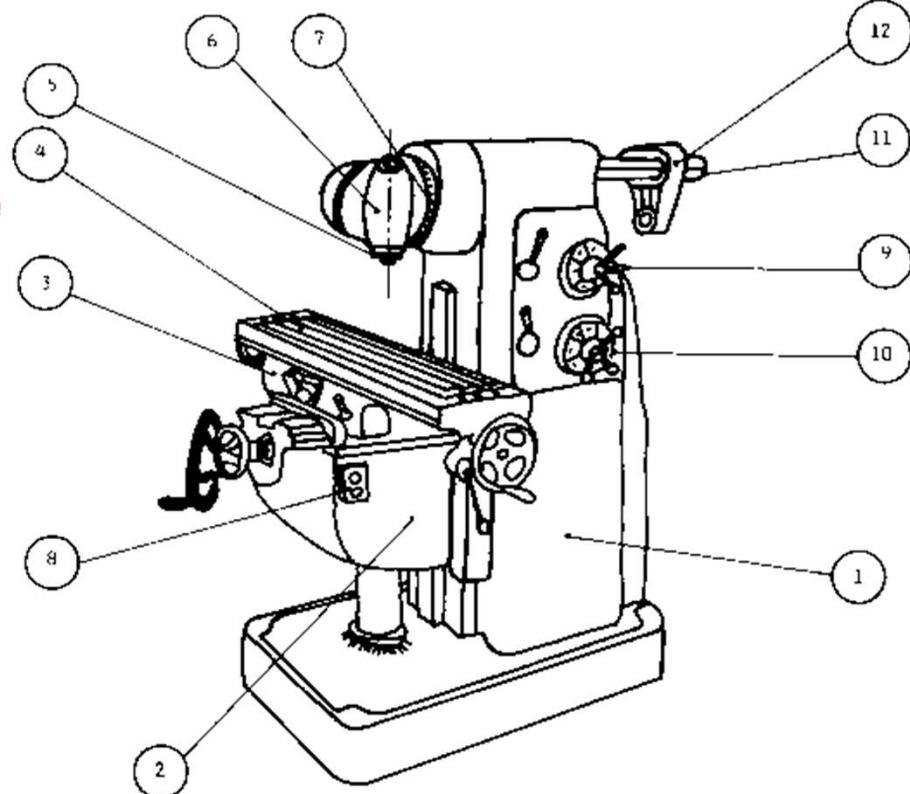
- A : banc
- B : poupée fixe
- C : bâti
- D : broche horizontale
- E : poupée mobile
- F : chariot longitudinal ou traînard
- G : chariot transversal
- H : chariot orientable ou supérieur
- I : barre de chariotage
- J : vis mère



INTRODUCTION

TYPOLOGIE DE MACHINES

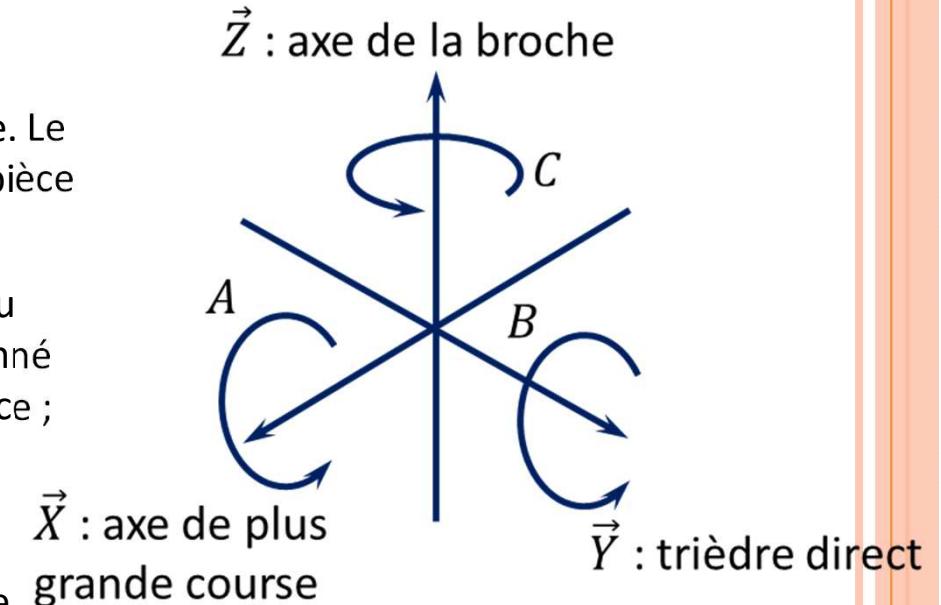
- 1 : Bâti
- 2 : Table
- 3 : Mouvement transversal
- 4 : Mouvement longitudinal
- 5 : Nez de broche
- 6 : Broche
- 7 : Inclinaison tête
- 8 : Mise en route
- 9 : Boîte de vitesse de broche
- 10 : Boîte de vitesse d'avance
- 11 : Support lunette
- 12 : Lunette



INTRODUCTION

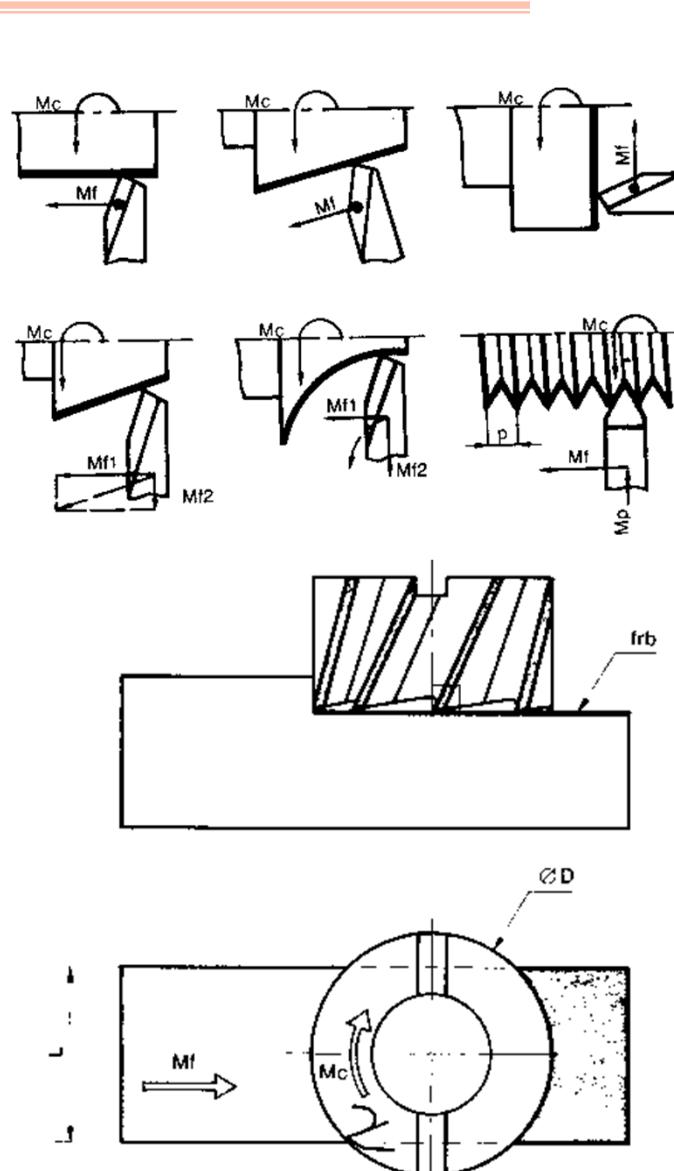
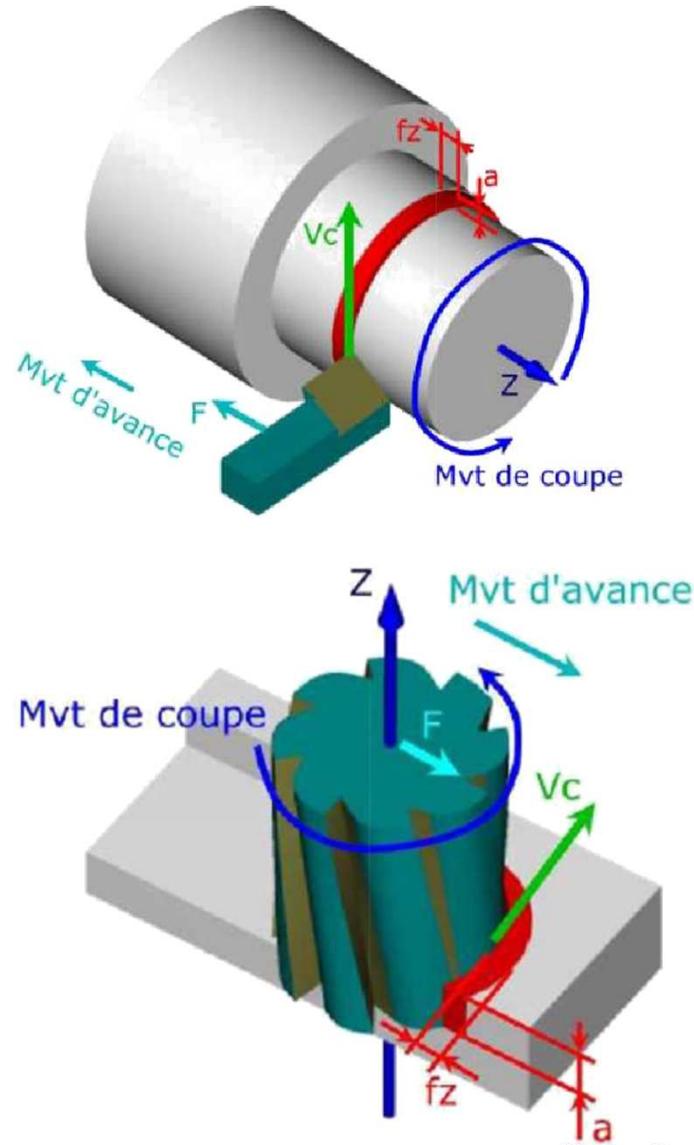
DÉFINITIONS PRÉLIMINAIRES

- La norme fixe la désignation des axes d'une machine-outil :
- \vec{Z}_m est parallèle à l'axe de rotation de la broche. Le sens positif est donné par l'éloignement de la pièce et de l'outil ;
- \vec{X}_m est perpendiculaire à \vec{Z}_m . Il a la direction du plus grand déplacement. Le sens positif est donné par l'éloignement de l'outil par rapport à la pièce ;
- \vec{Y}_m est tel que le trièdre $(\vec{X}_m, \vec{Y}_m, \vec{Z}_m)$ soit orthonormé direct ;
- A, B, C désignent les axes de rotation autour de \vec{X}_m, \vec{Y}_m et \vec{Z}_m .



INTRODUCTION

DÉFINITIONS PRÉLIMINAIRES



INTRODUCTION

DÉFINITIONS PRÉLIMINAIRES

En usinage, on associe au mouvement de coupe une **vitesse de coupe, notée V_c en m/min.** Elle est donnée par le constructeur. Elle dépend du matériau de l'outil et du matériau à usiner. Elle permet de calculer la fréquence de rotation de la broche N :

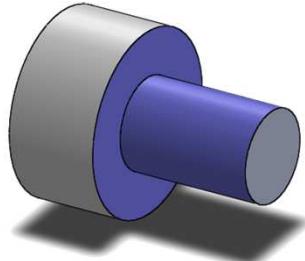
$$N = 1000 \frac{V_c}{\pi D}$$

D : diamètre de la pièce en tournage (en mm)
 D : diamètre de l'outil en fraisage (en mm)

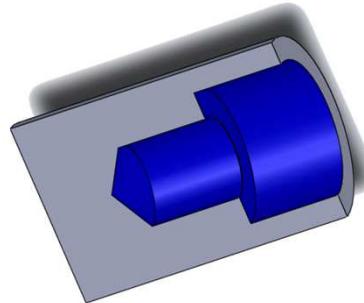
On associe au mouvement d'avance une **vitesse d'avance, notée F en mm/dent/tour** (en tournage, l'outil n'a qu'une dent).

INTRODUCTION SURFACES GÉNÉRÉES

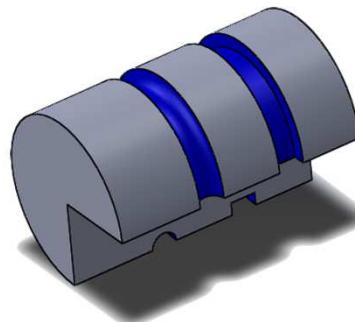
Tournage



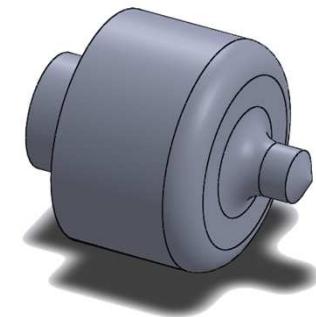
Dressage – Chariotage



Perçage

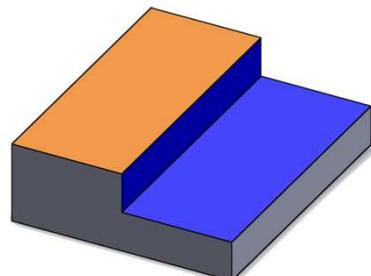


Tronçonnage et gorges

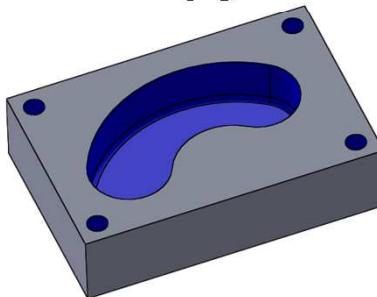


Formes quelconques

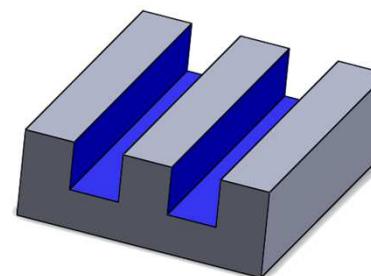
Fraisage



Surfaçage – Plans épaulés



Perçage et poches

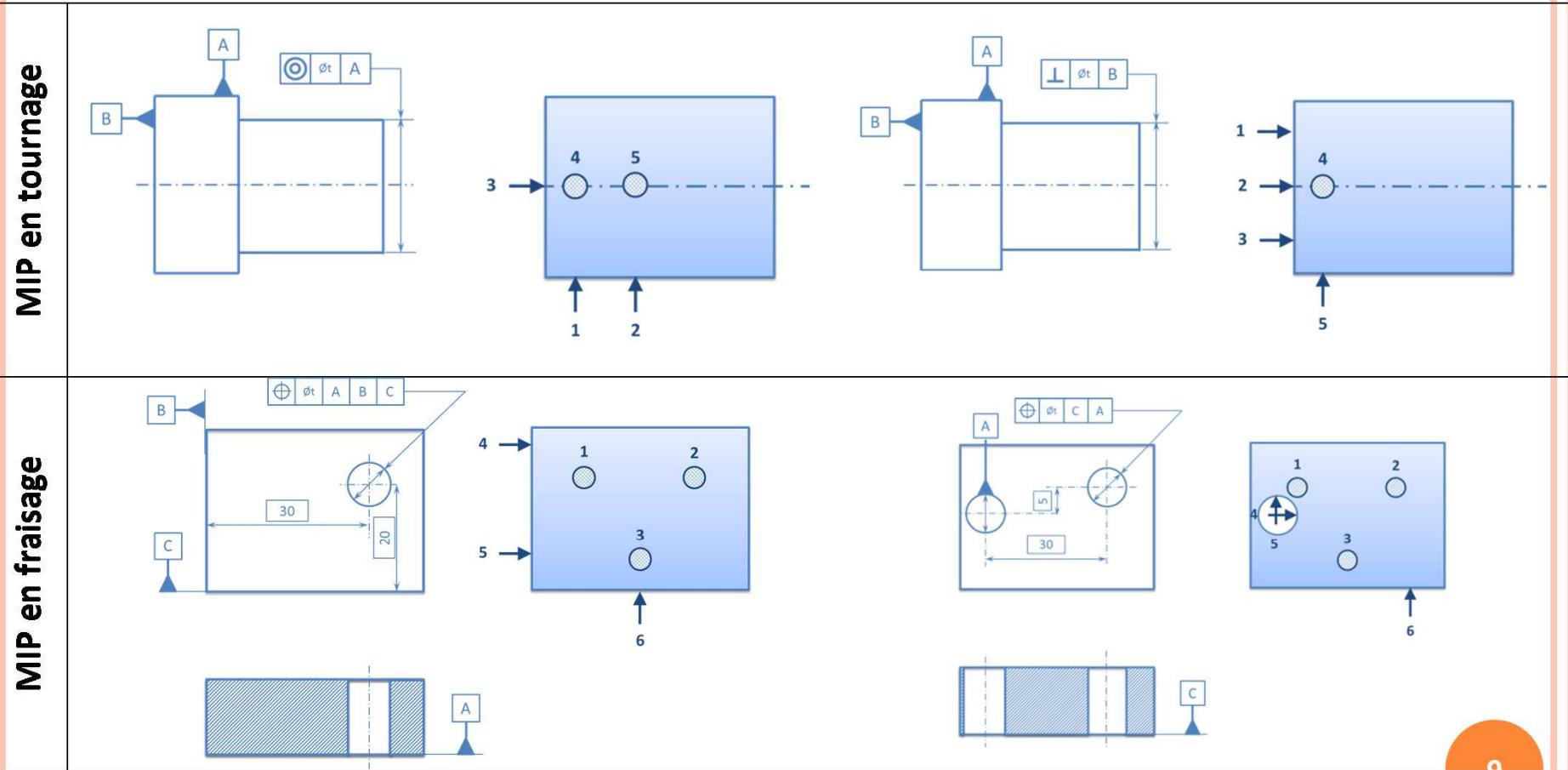


Rainurage



Formes quelconques

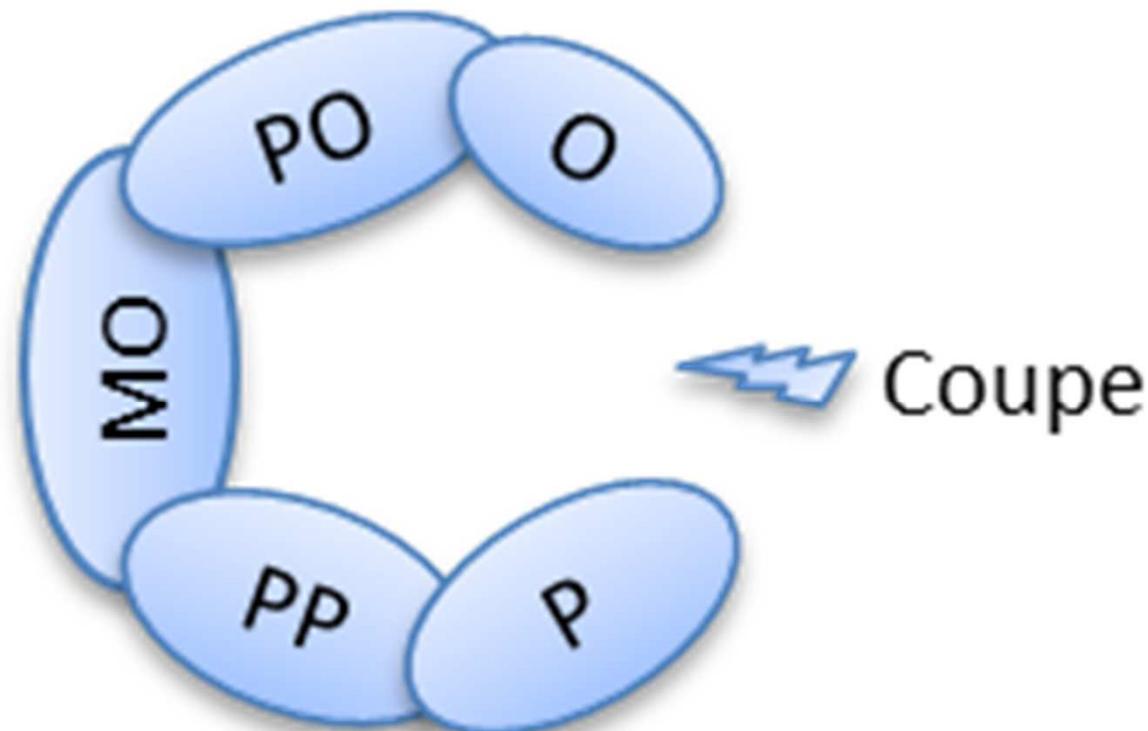
INTRODUCTION MISE EN POSITION ISOSTATIQUE



9

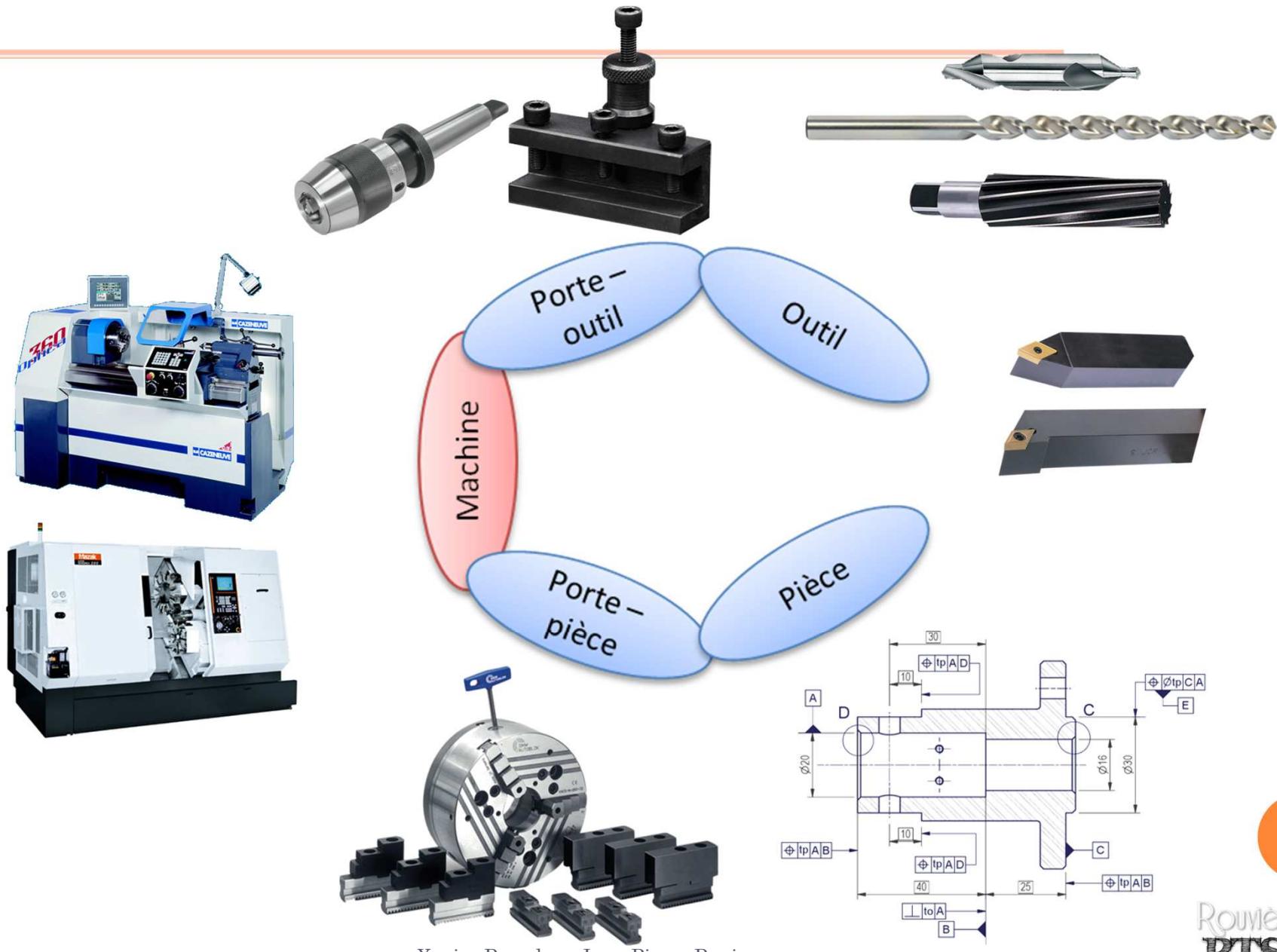
INTRODUCTION

CELLULE ÉLÉMENTAIRE D'USINAGE



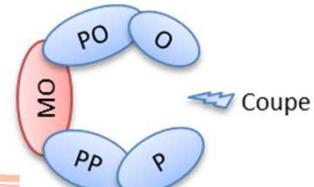
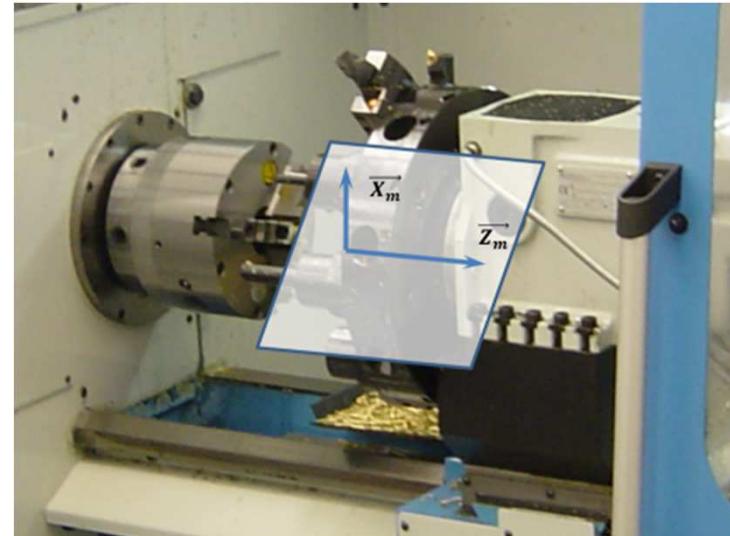
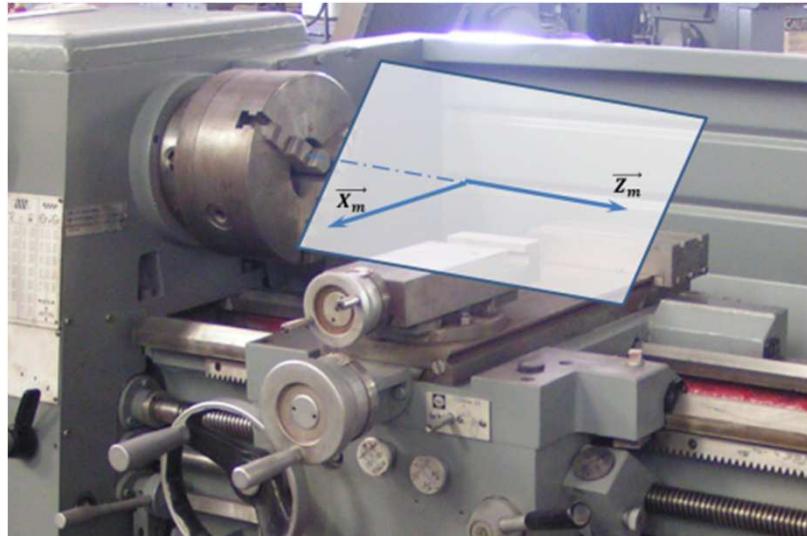
10

LE TOURNAGE



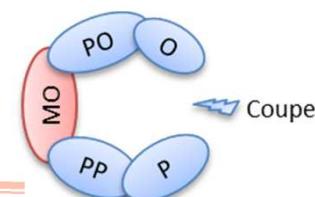
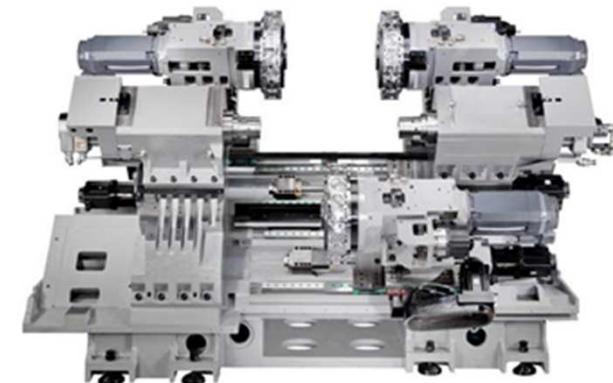
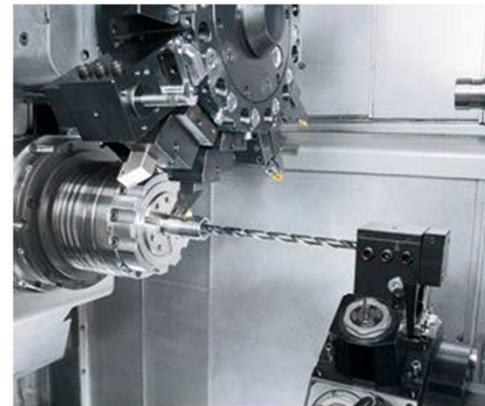
Xavier Pessoles - Jean-Pierre Pupier

LE TOURNAGE LES MACHINES

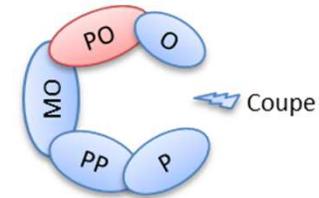


12

LE TOURNAGE LES MACHINES



LE TOURNAGE LES PORTE OUTILS



Tourelles et portes outils de tours conventionnels



Tourelle de centre d'usinage à commande numérique



Porte outil « carré »



Mandrin avec cône morse



Attachement VDI pour outil à charioter dresser

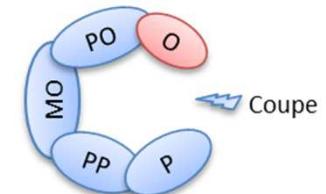


Attachement VDI pour outil à percer ou dresser



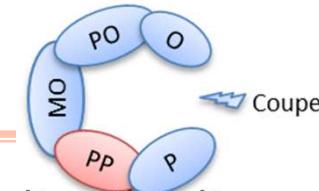
14

LE TOURNAGE OUTILS



15

LE TOURNAGE PORTE PIÈCE



- Le porte pièce est à l'interface entre la pièce et la machine. À ce titre, il doit répondre à plusieurs exigences :
 - permettre à l'outil d'usiner la pièce ;
 - permettre la lubrification de la coupe ;
 - mettre la pièce en position (MIP) ;
 - maintenir la pièce en position (MAP) ;
 - être aisément manipulable ;
 - permettre l'évacuation du copeau ;
 - mettre et maintenir en position le montage de la pièce dans la machine.



Mandrin avec jeux de mors

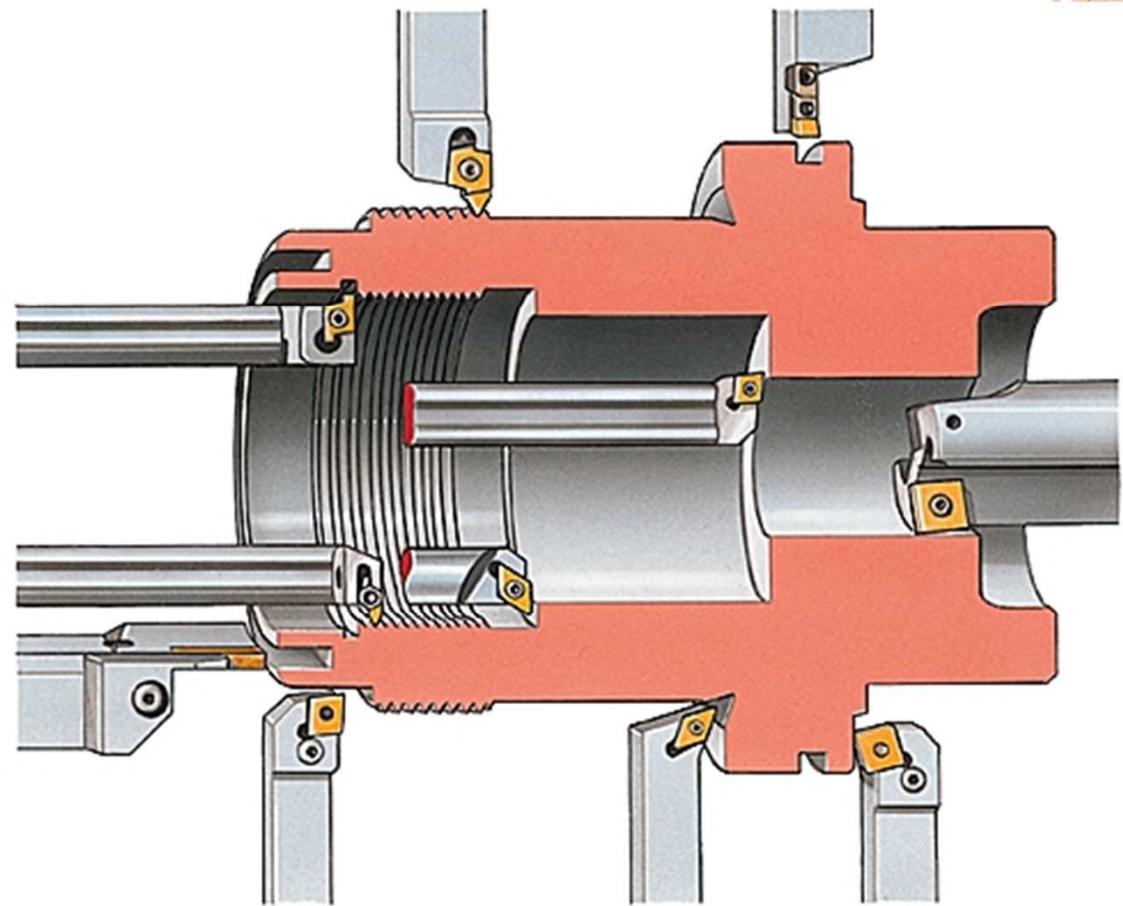
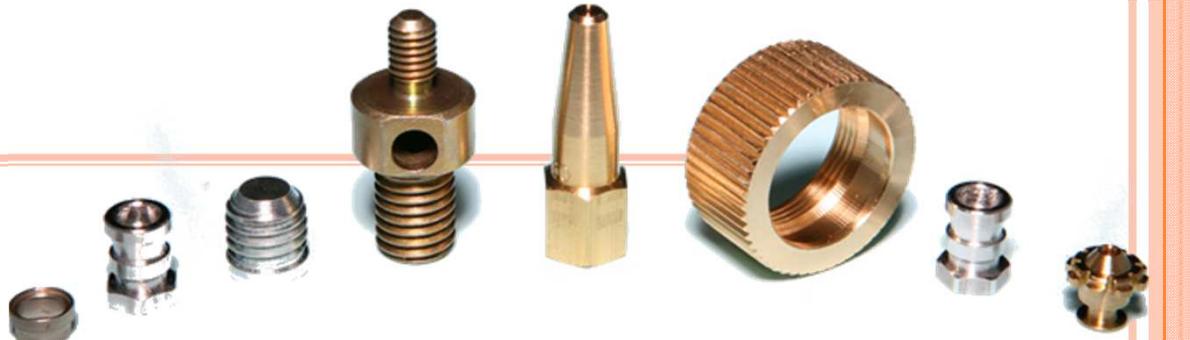


Mandrin expansible

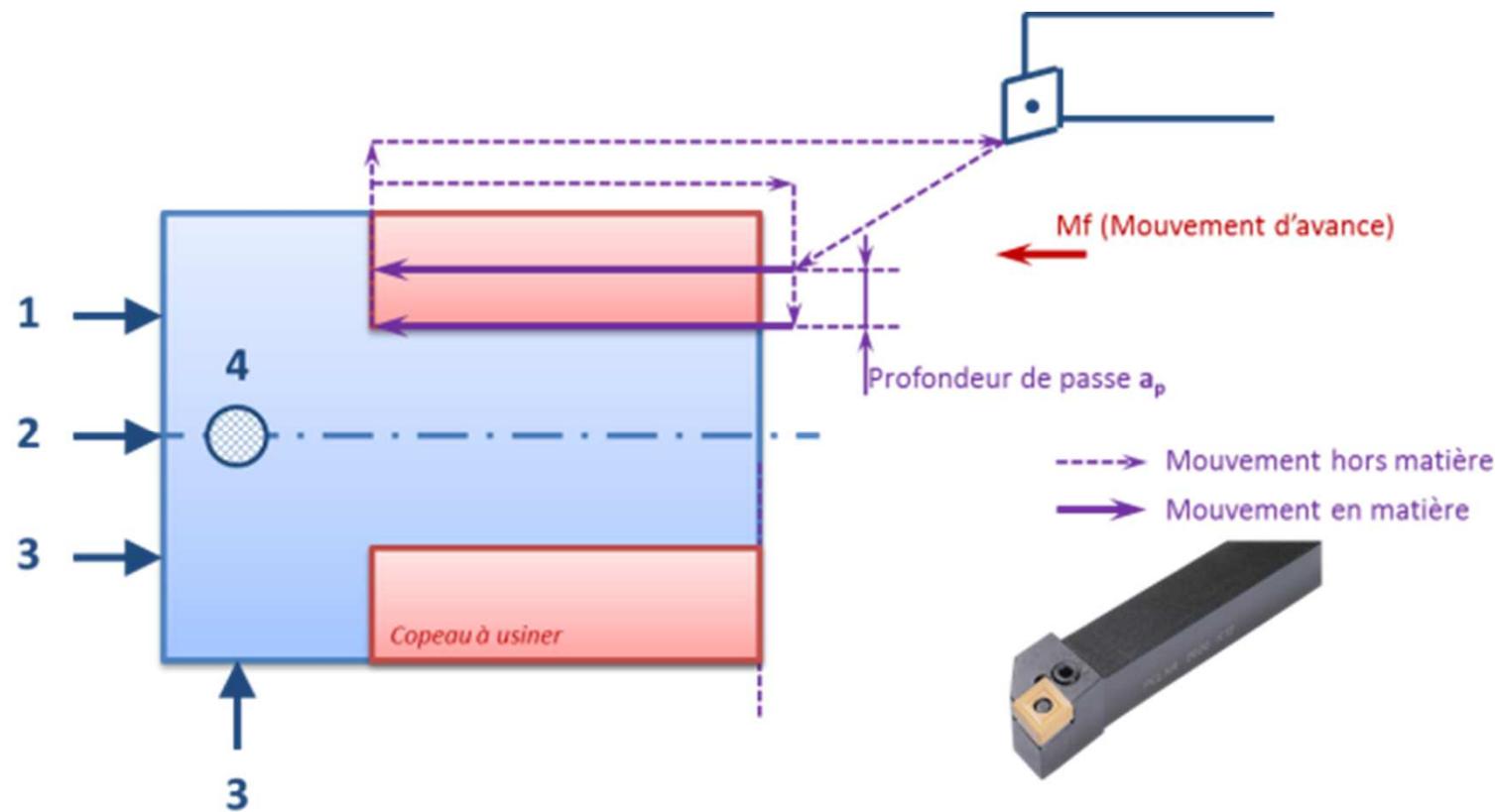


Montage entre pointe pour pièces longues

LE TOURNAGE PIÈCES

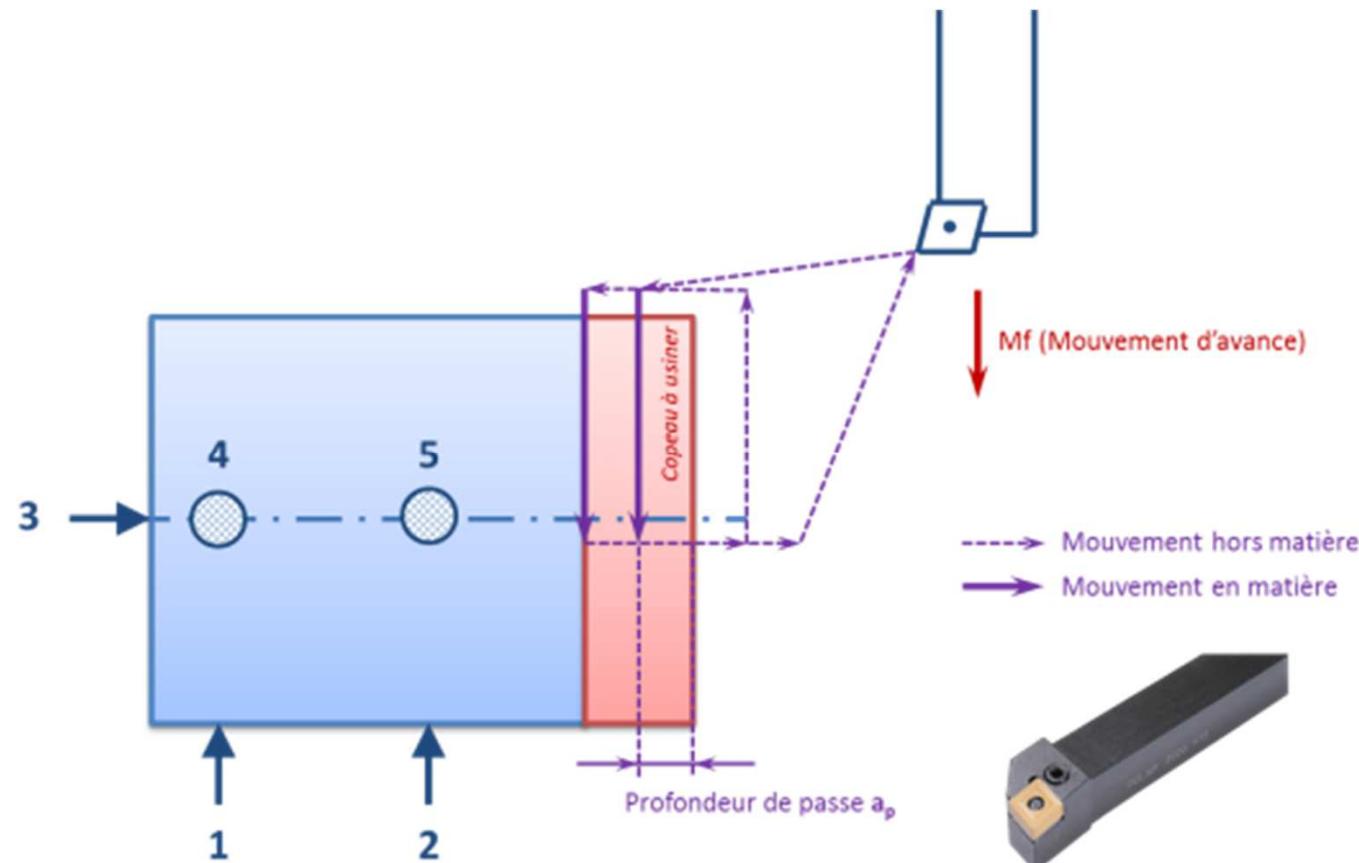


LE TOURNAGE PIÈCES



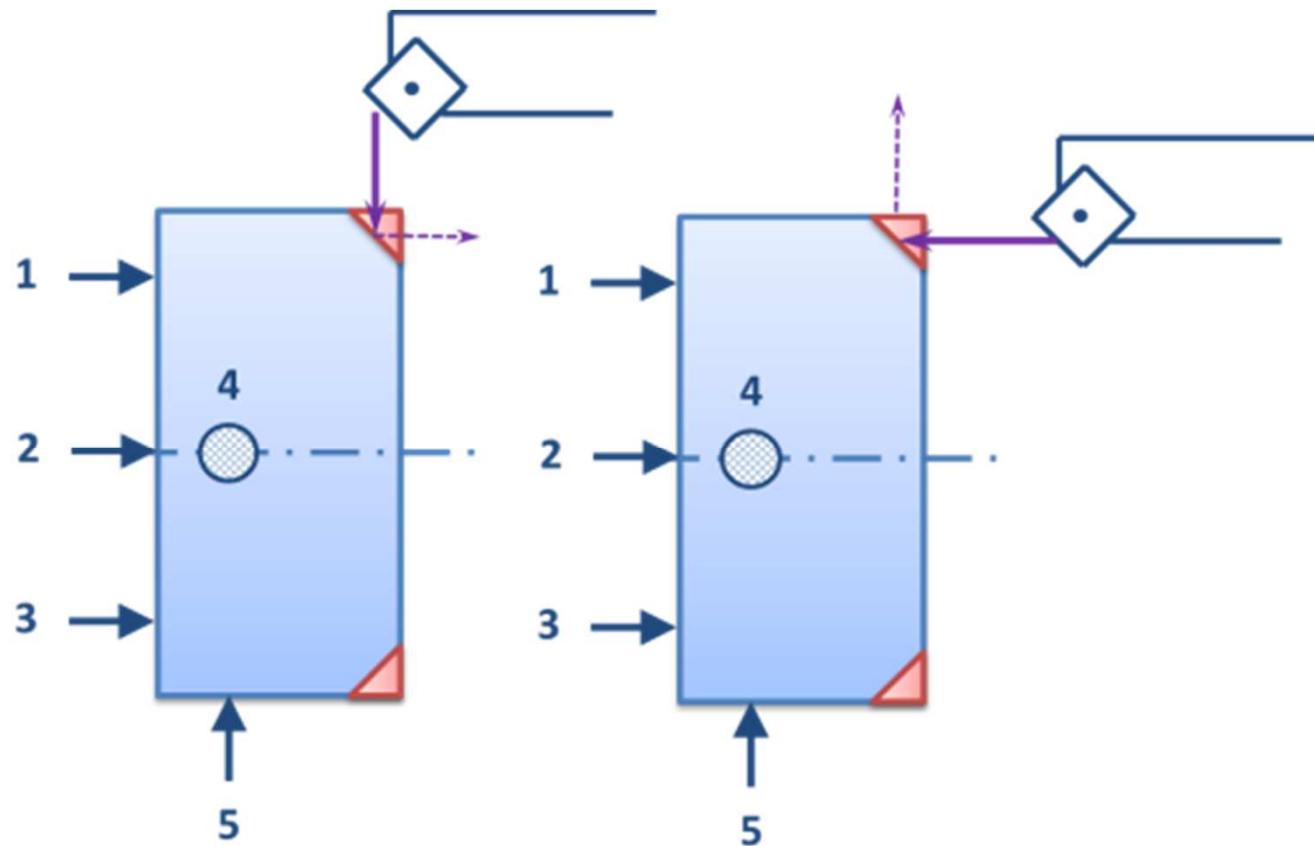
18

LE TOURNAGE PIÈCES



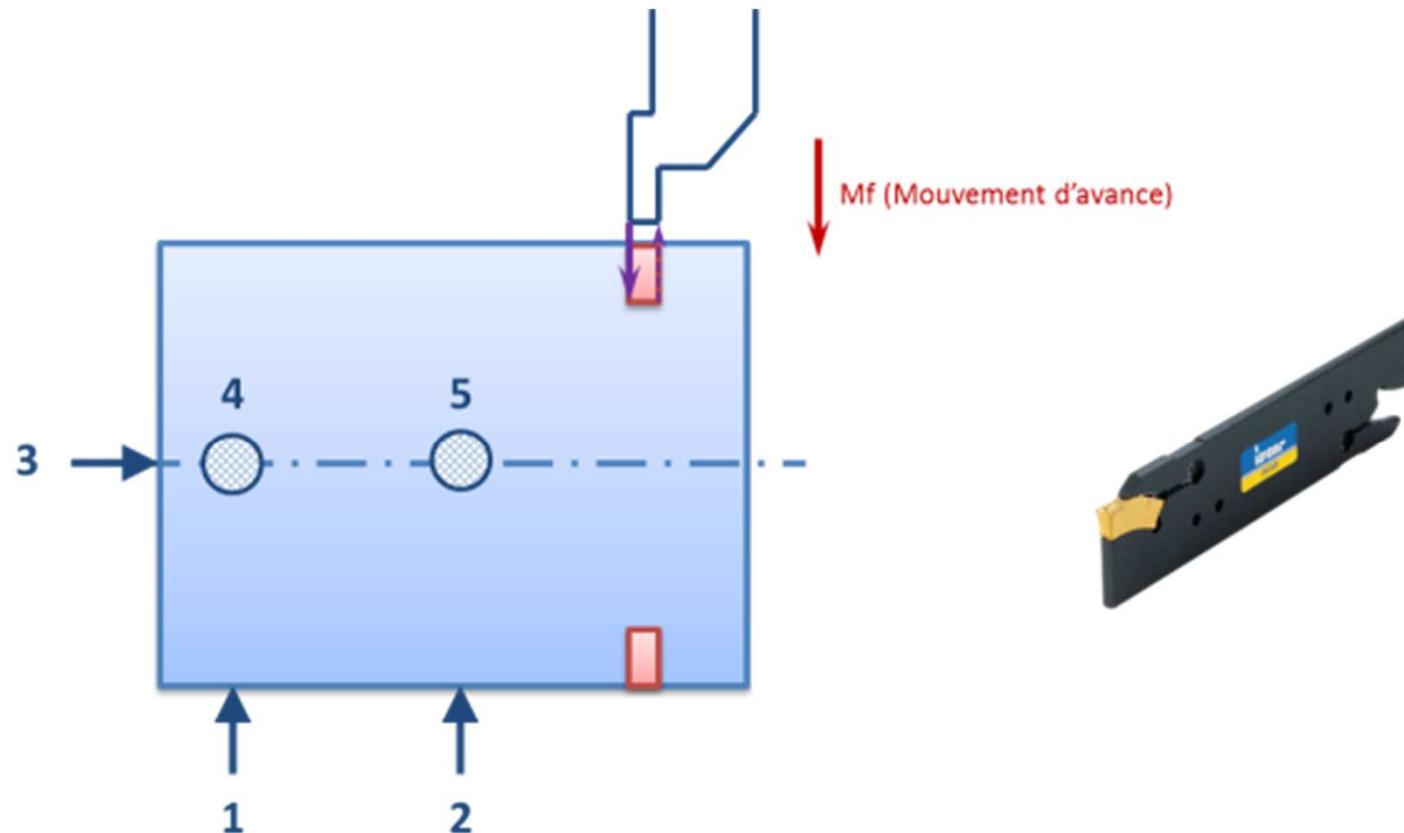
19

LE TOURNAGE PIÈCES



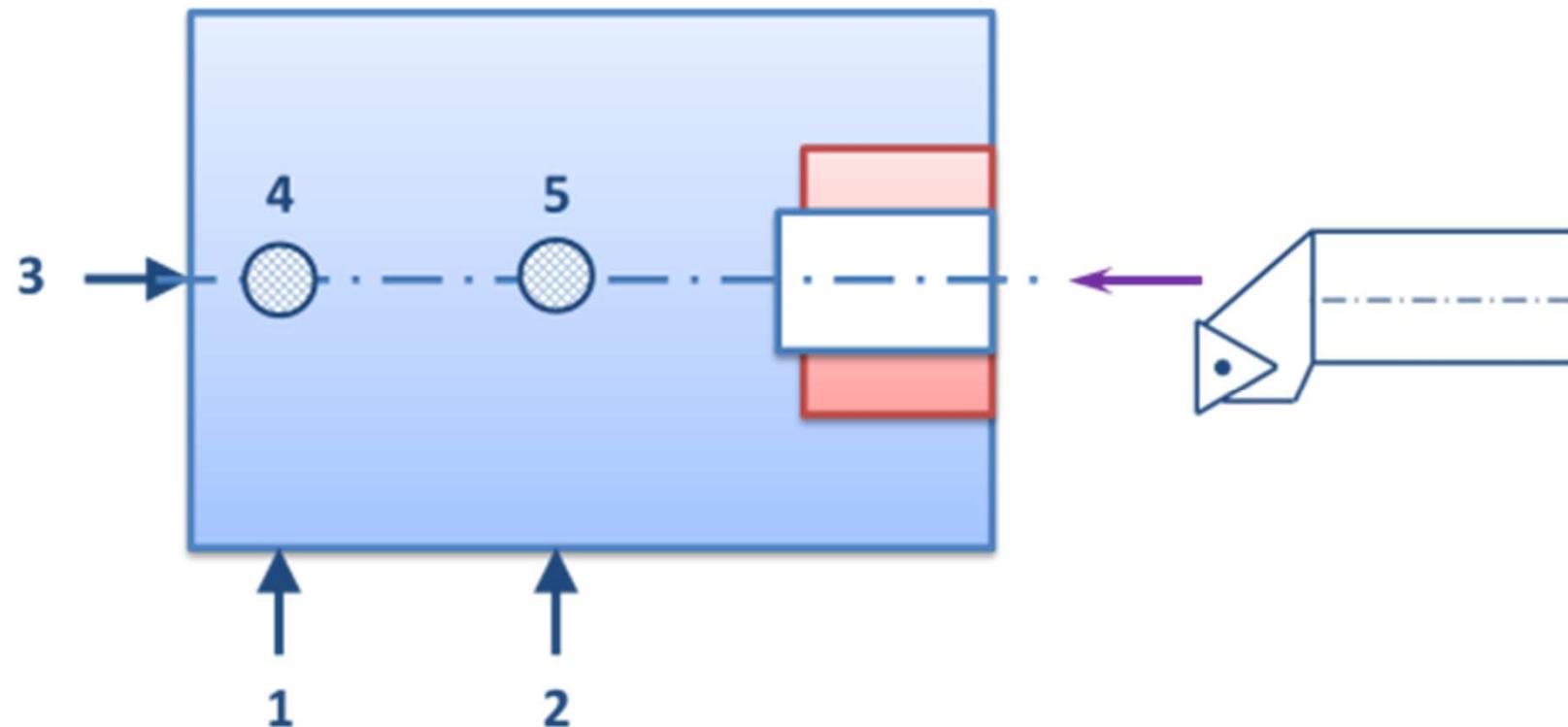
20

LE TOURNAGE PIÈCES



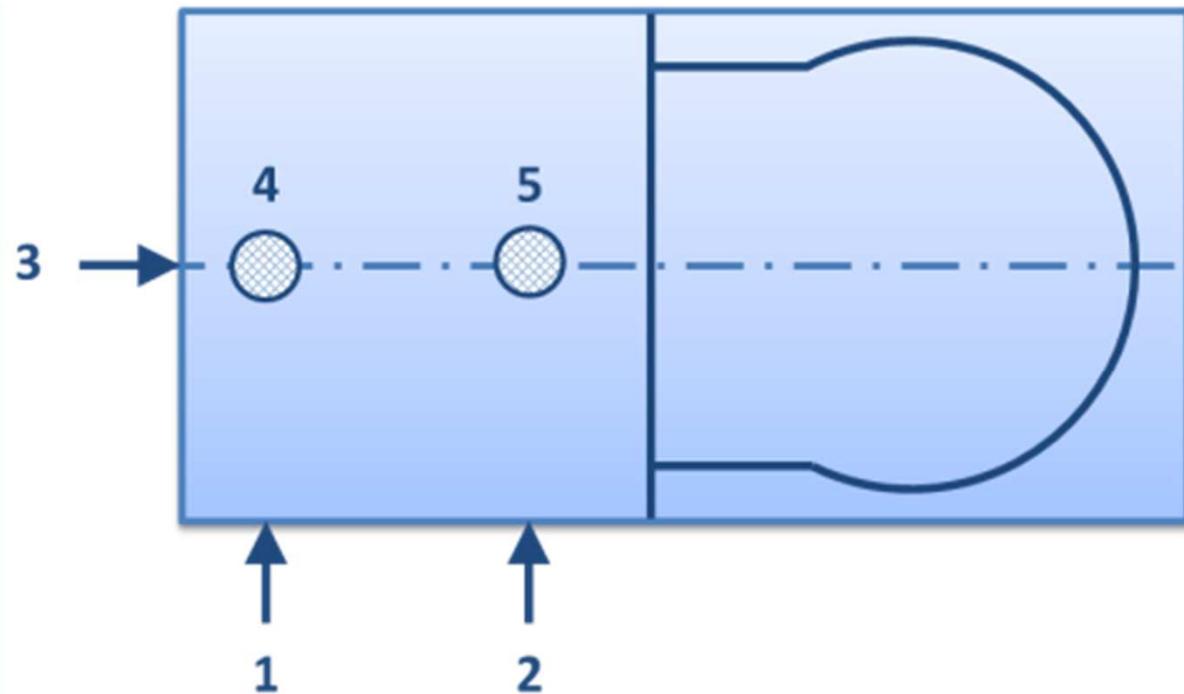
21

LE TOURNAGE PIÈCES



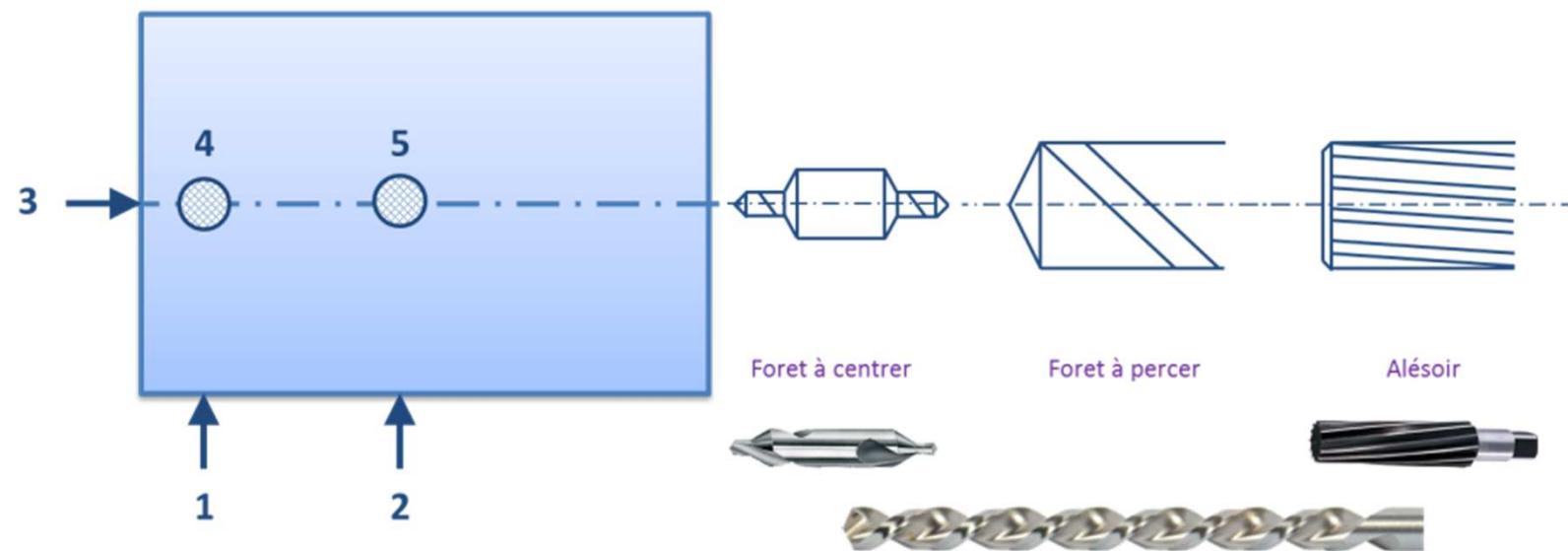
22

LE TOURNAGE PIÈCES



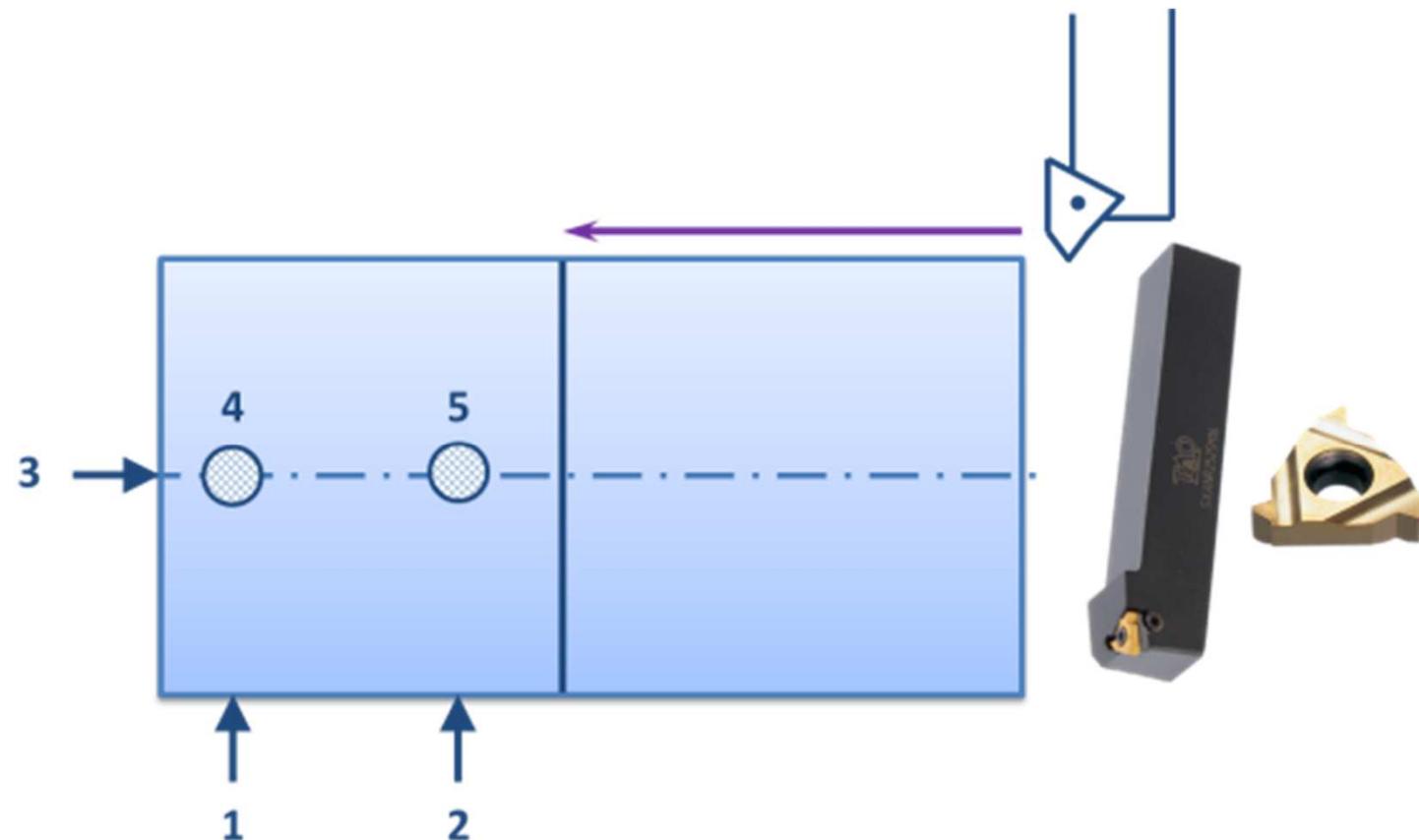
23

LE TOURNAGE PIÈCES



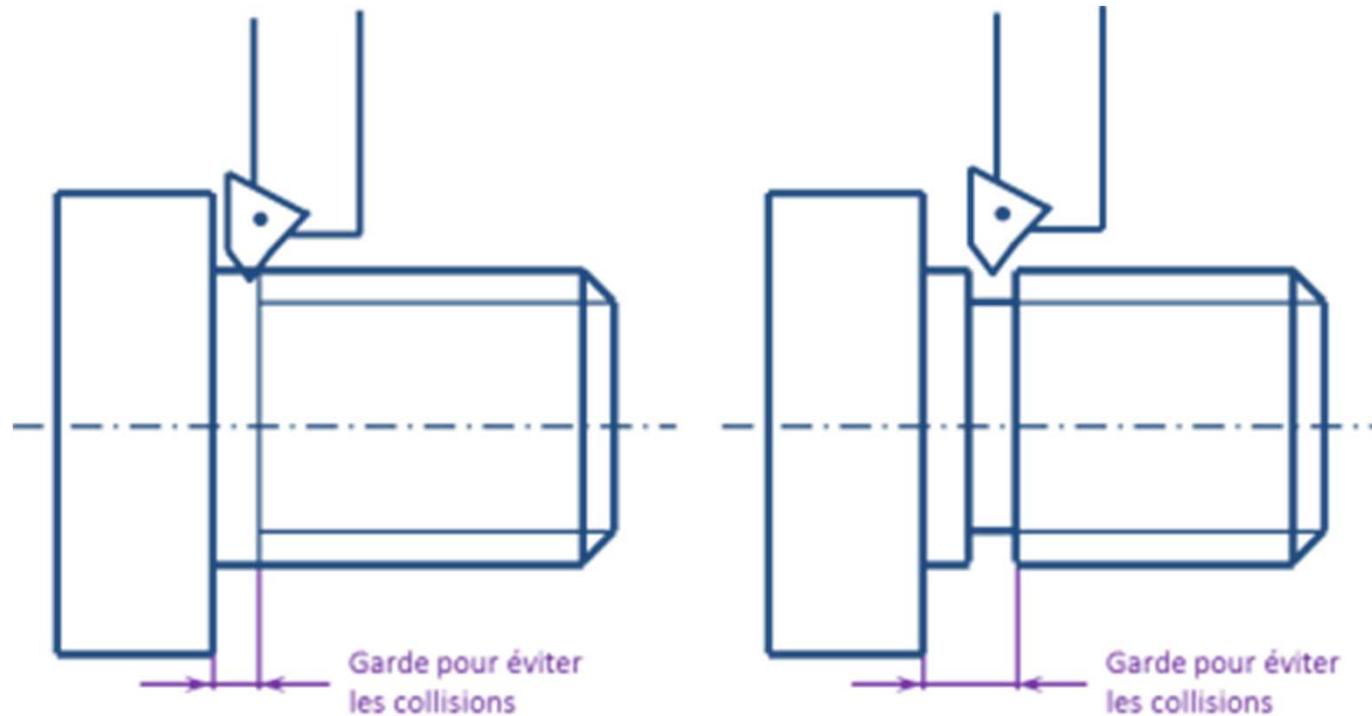
24

LE TOURNAGE PIÈCES



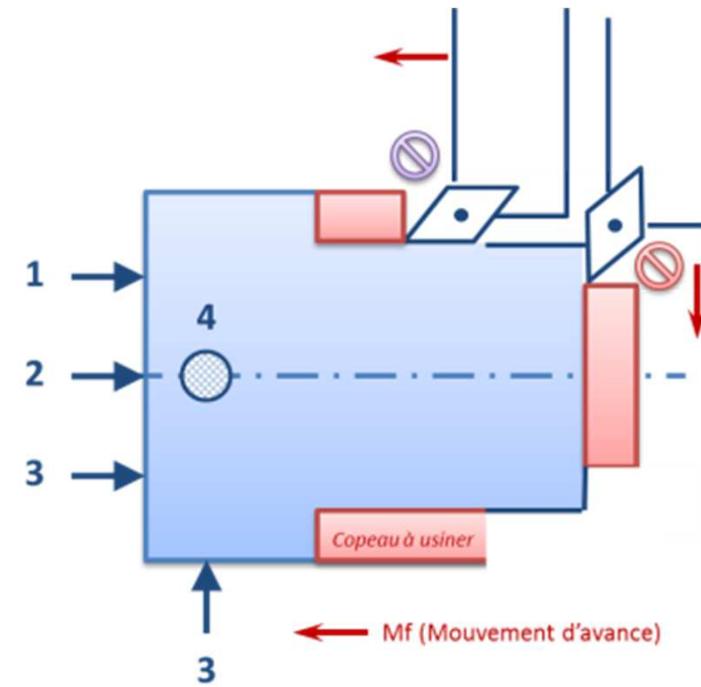
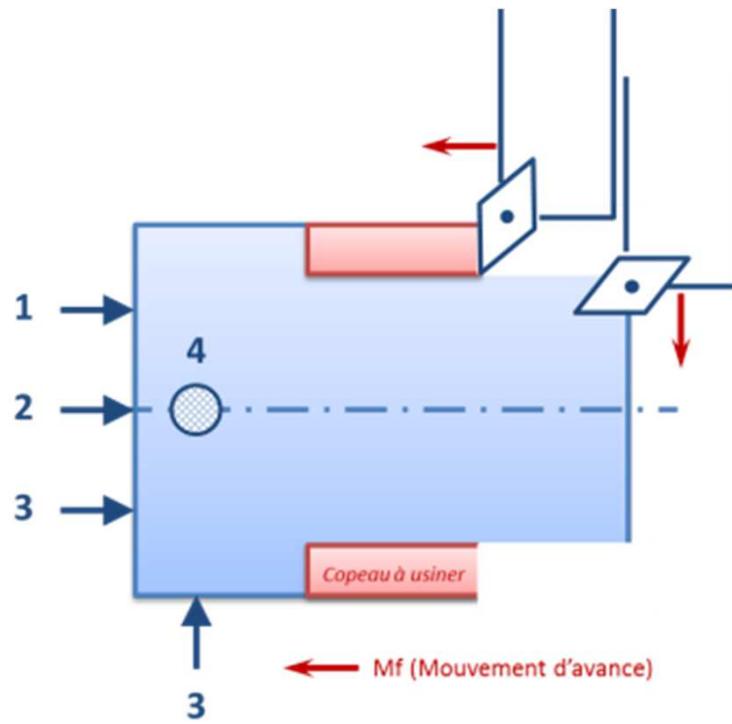
25

LE TOURNAGE PIÈCES



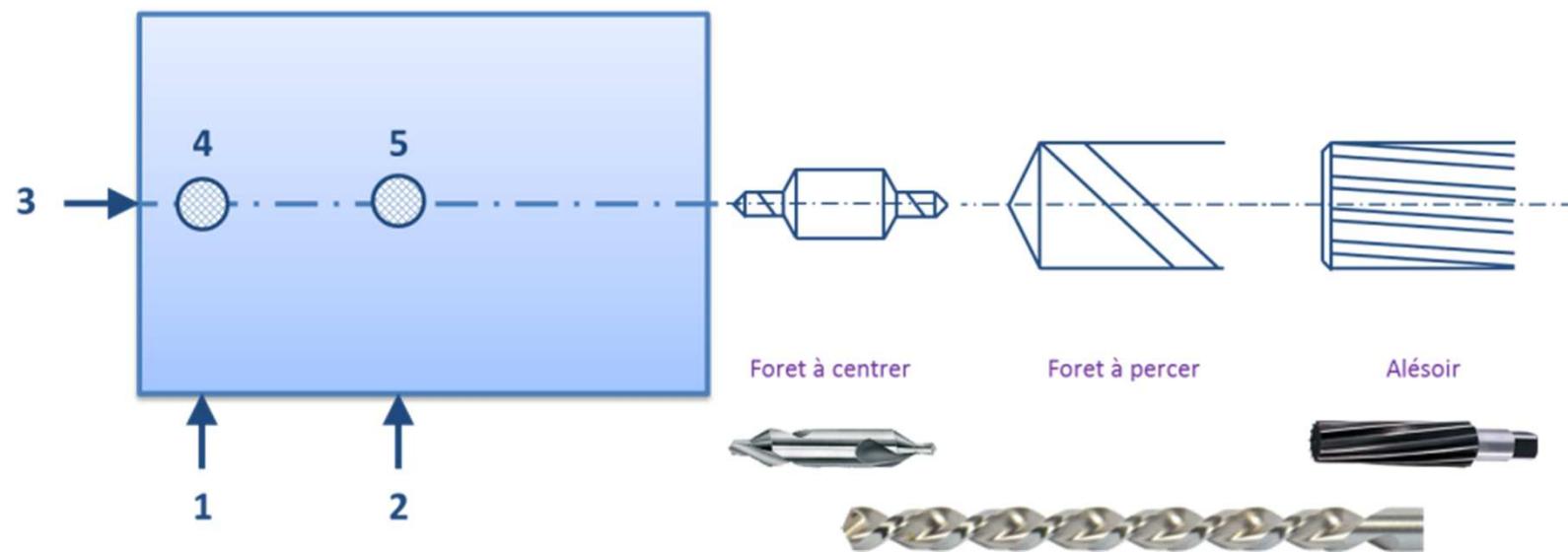
26

LE TOURNAGE PIÈCES



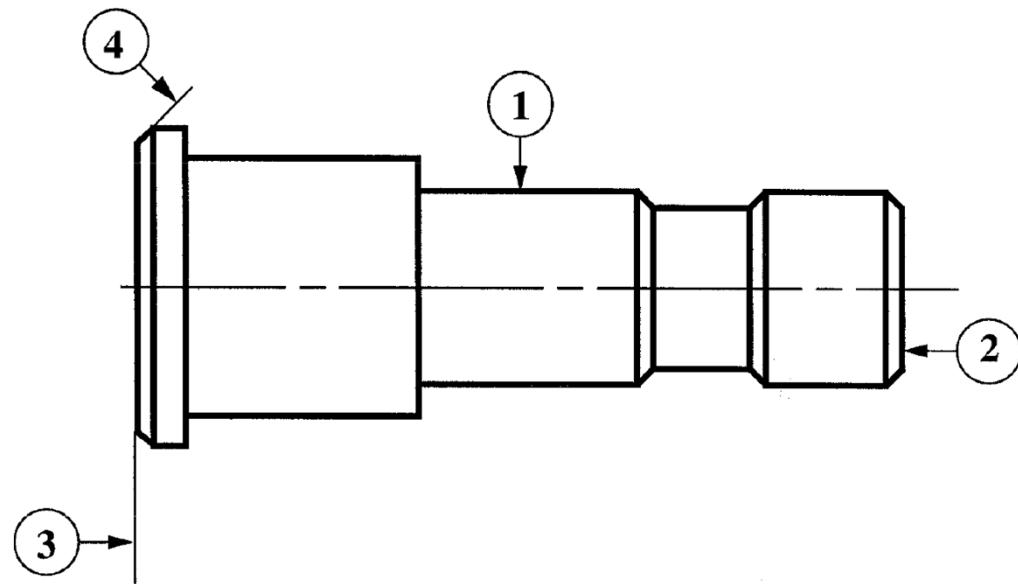
27

LE TOURNAGE PIÈCES



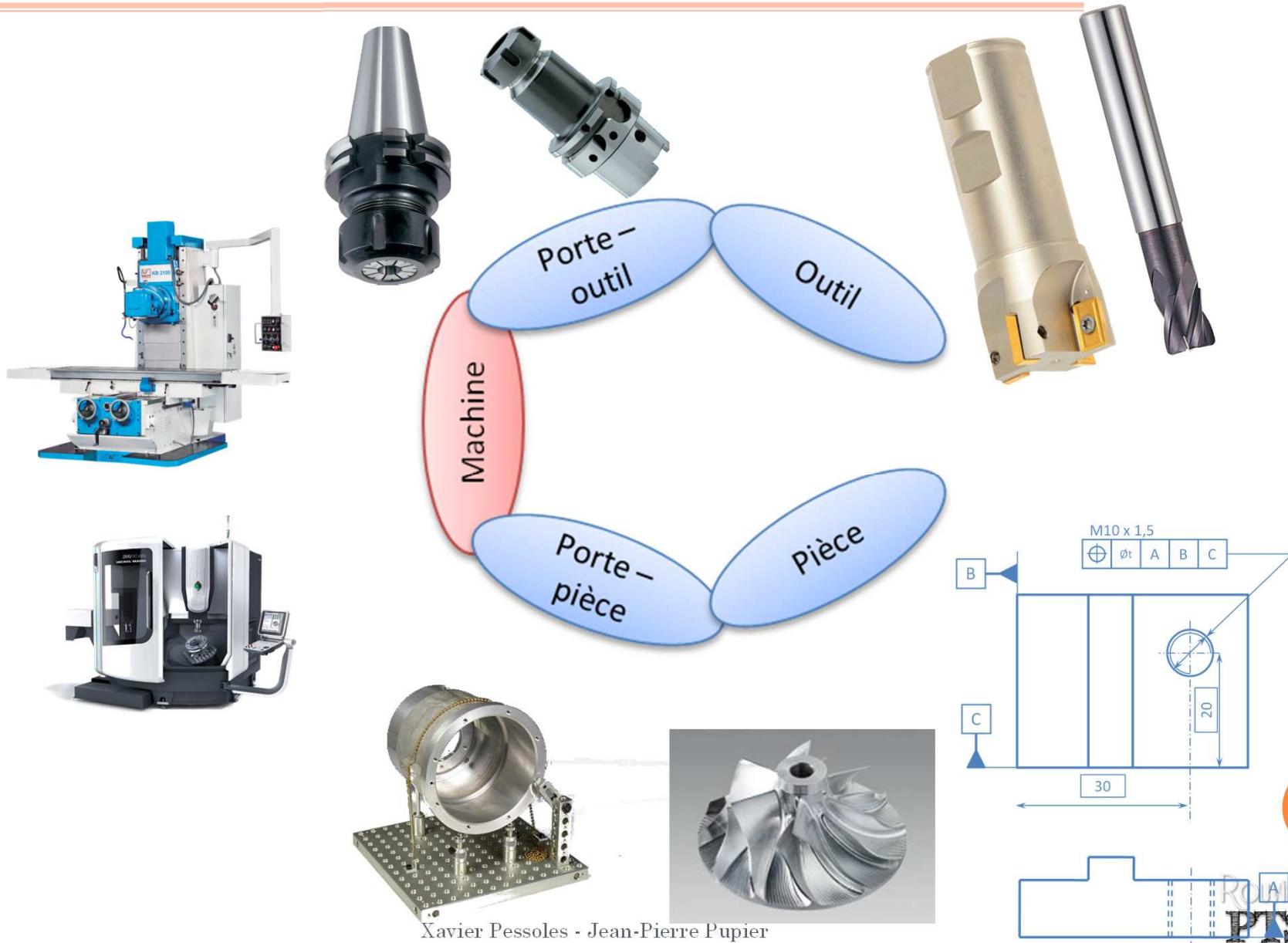
28

LE TOURNAGE CONTRAT DE PHASE

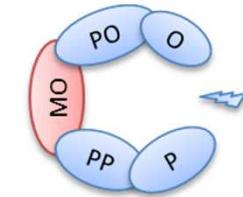


29

LE FRAISAGE



LE FRAISAGE LES MACHINES



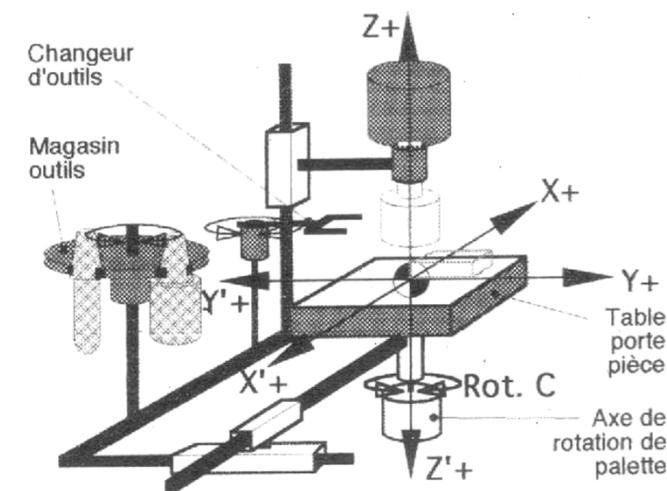
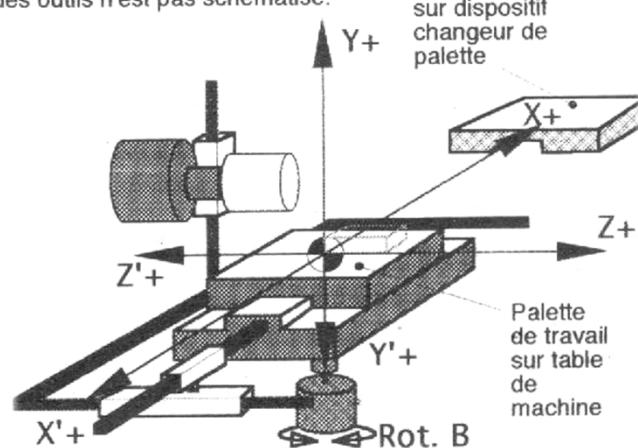
Fraiseuse conventionnelle 3 axes



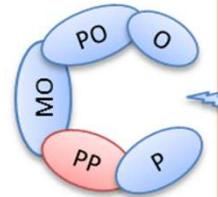
Centres d'usinage 5 axes



Le système de changement des outils n'est pas schématisé.



LE FRAISAGE LES PORTE OUTILS



Magasin d'outil sur centre d'usinage



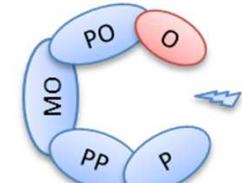
Attachements ISO standards



Attachements HSK

32

LE FRAISAGE OUTILS



Fraise deux tailles – 8 dents à surfacer ou à contourner



Fraise 3 tailles 8 dents à rainurer



Fraise à rainurer à plquettes rapportées



Fraise disque à rainurer



Fraise de forme



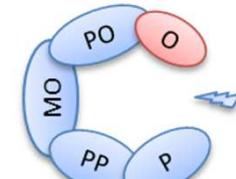
Fraise 1 taille à surfacer



Fraise 1 taille à surfacer

33

LE FRAISAGE OUTILS



*Fraise à
lamer*



*Fraise à
chanfreiner*



*Fraise à
rainurer*



*Fraise
hémisphérique*



*Fraise
torique*



*Fraise à
rainurer*



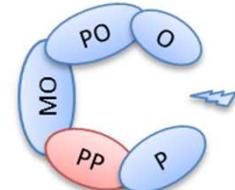
*Fraise à
ravager*



*Fraise 2
tailles*

34

LE FRAISAGE PORTE PIÈCE



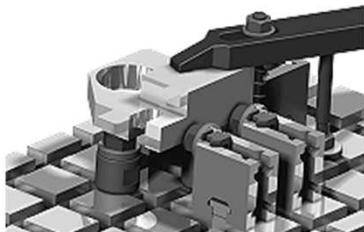
Etau plaqueurs



Etau orientable



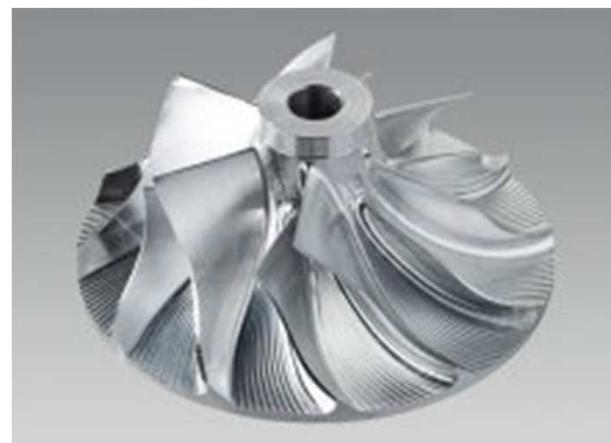
Souble table sinus



Montages modulaires

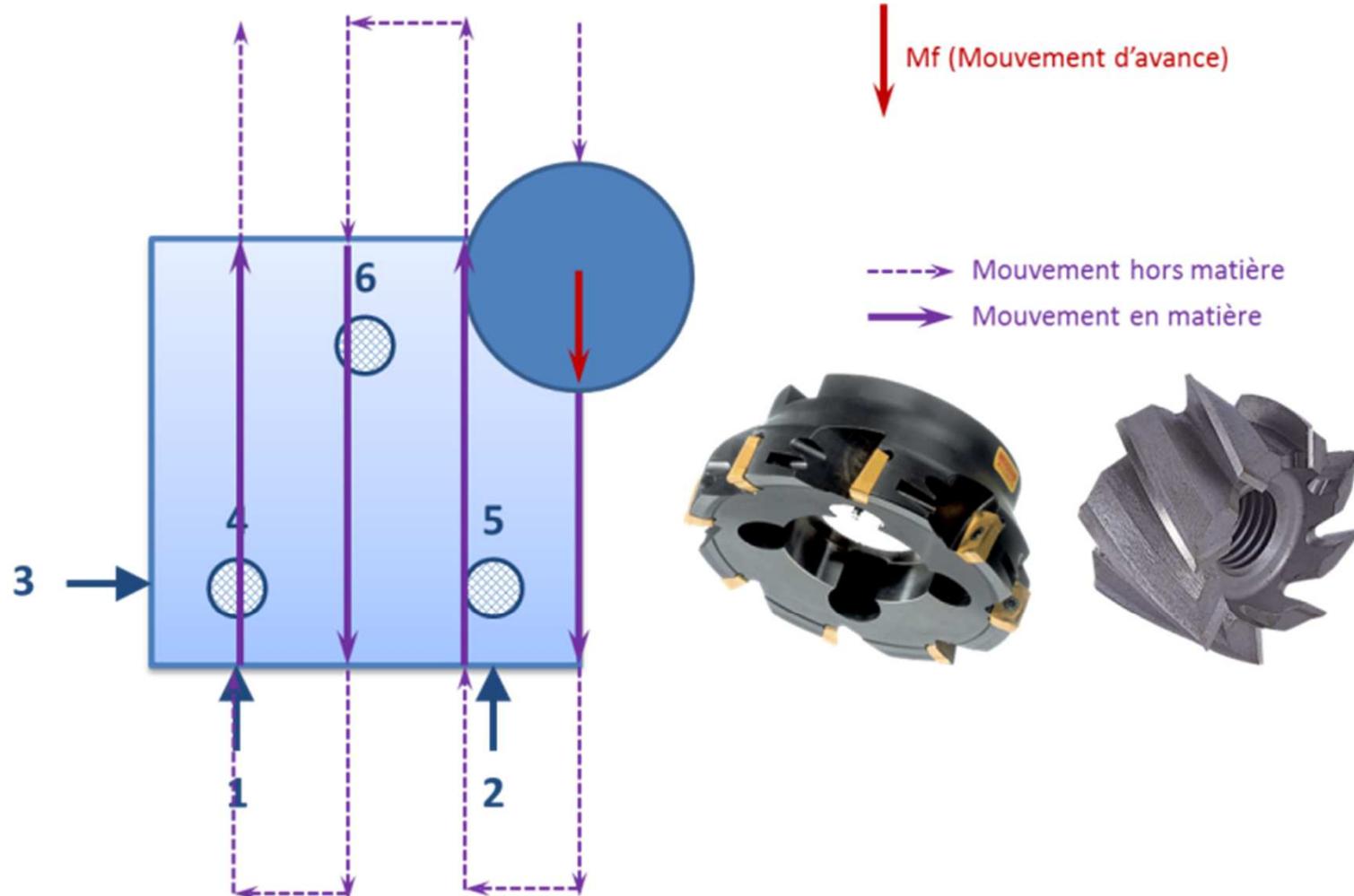


LE FRAISAGE PIÈCES

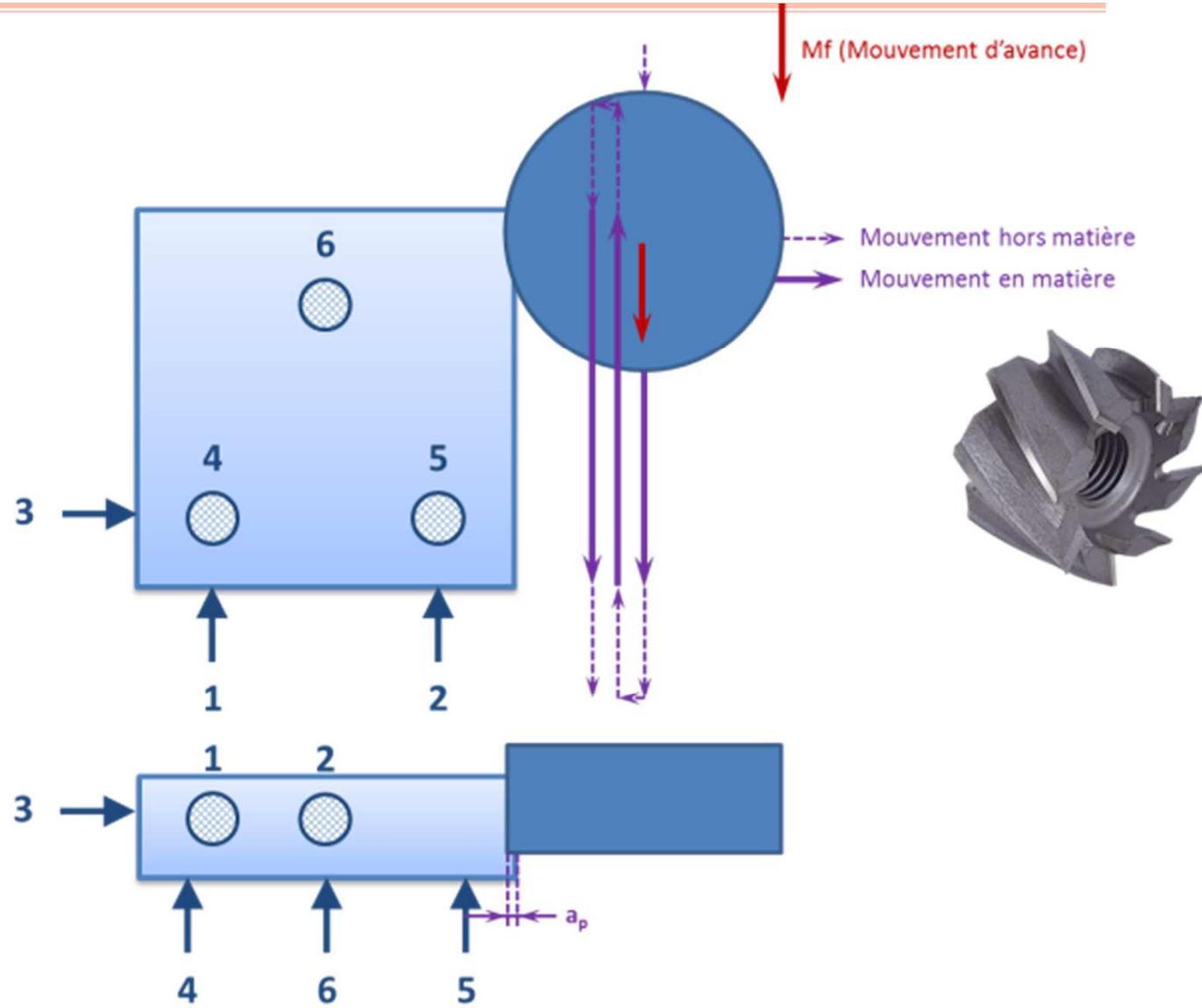


36

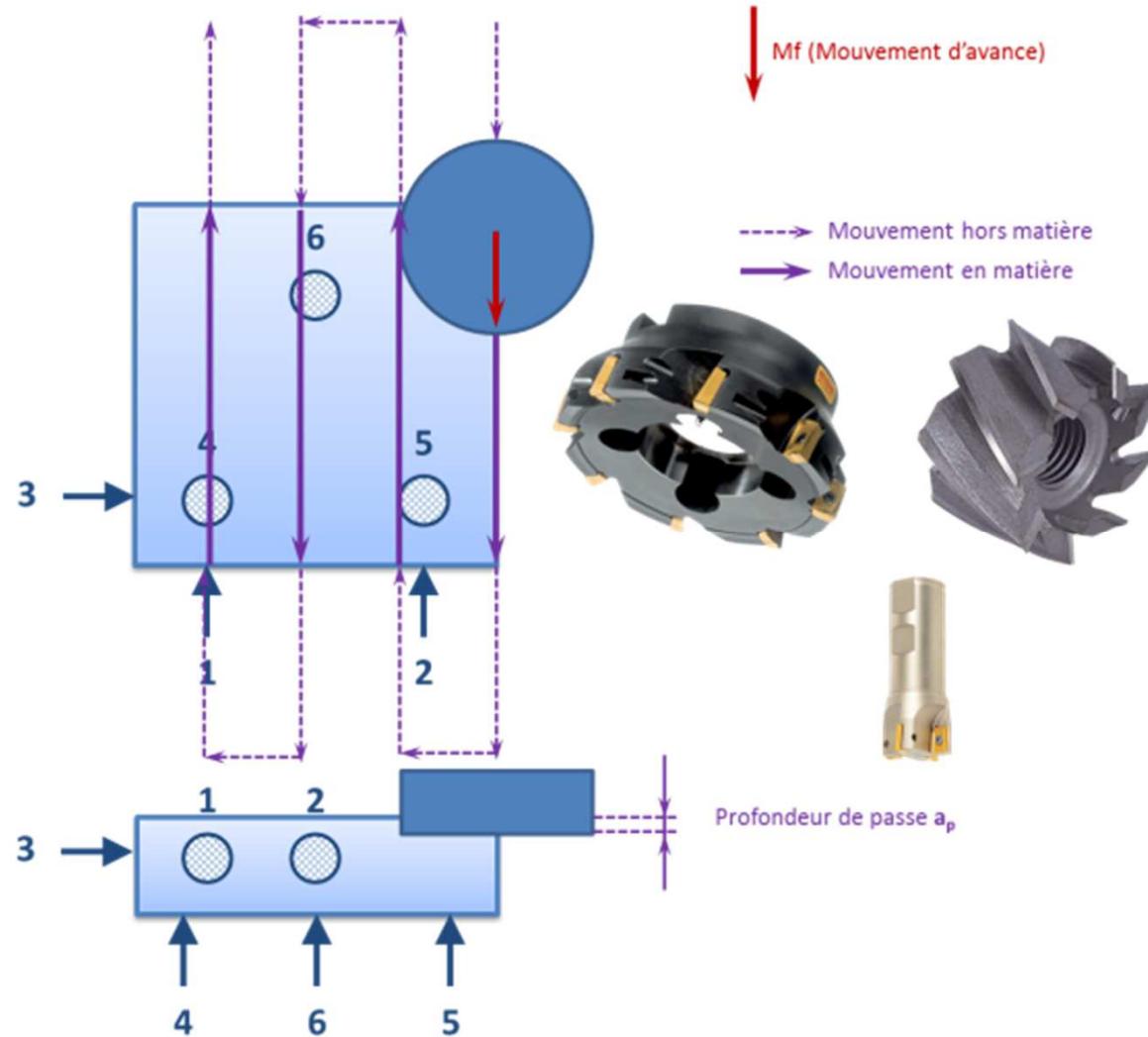
LE FRAISAGE PIÈCES



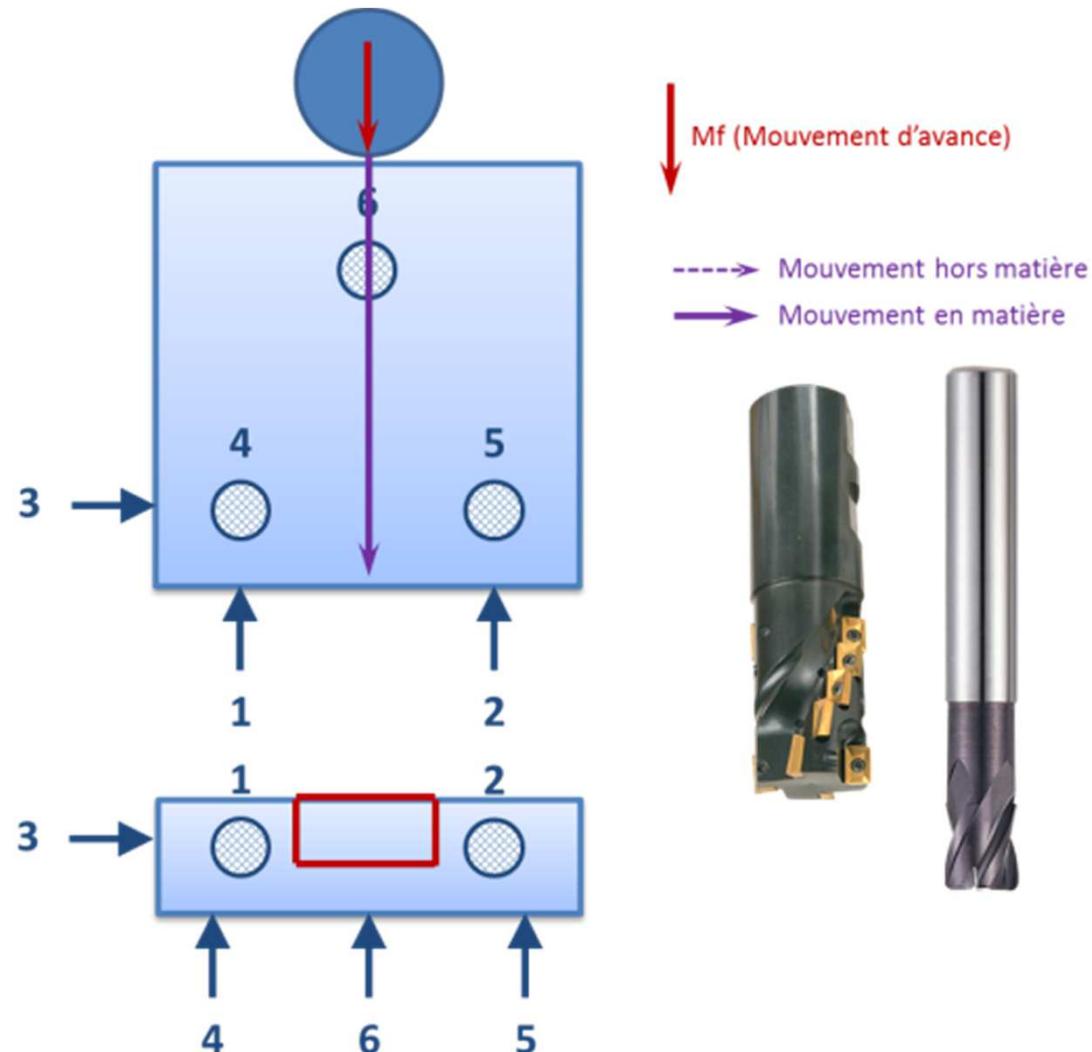
LE FRAISAGE PIÈCES



LE FRAISAGE PIÈCES

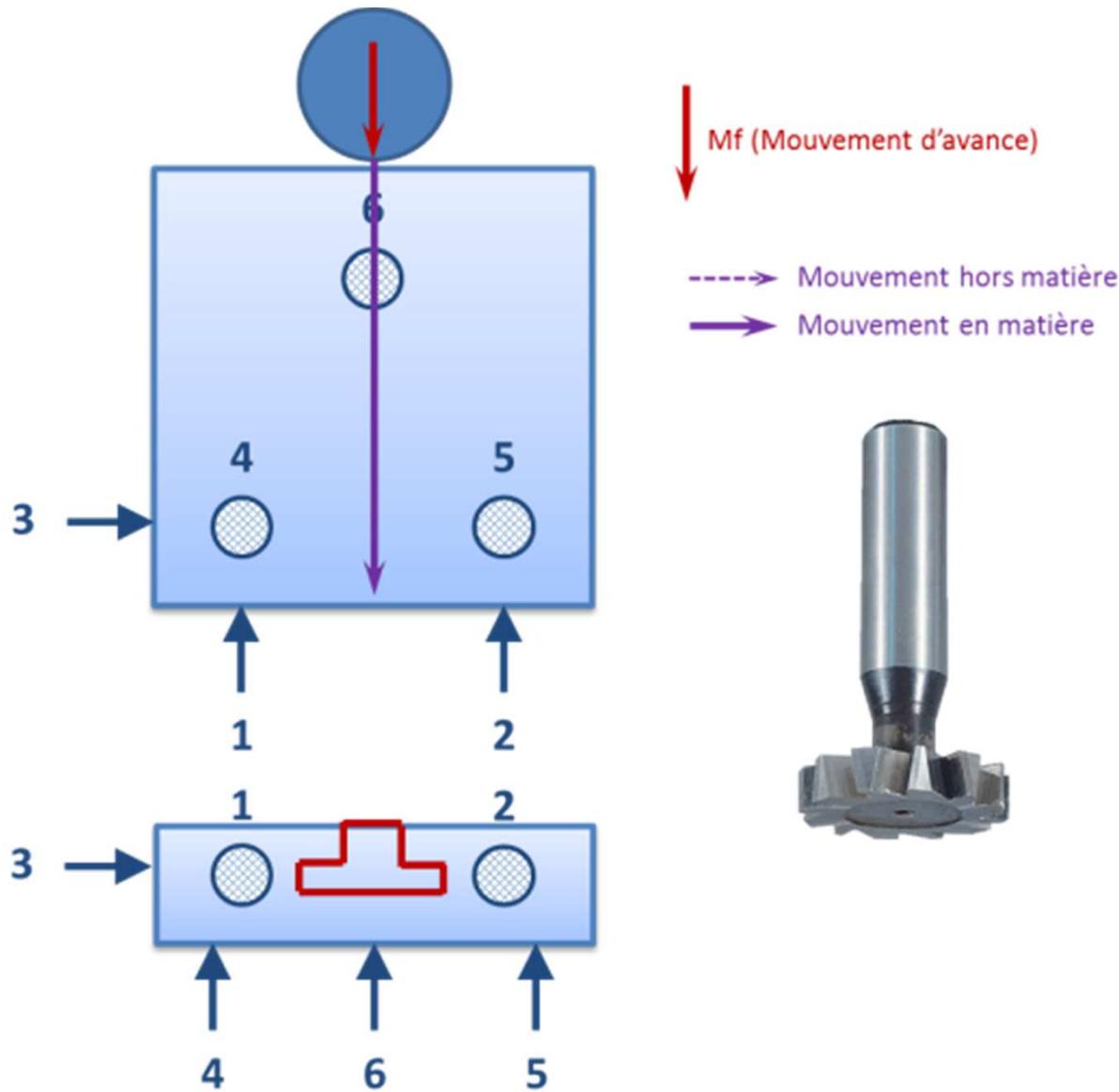


LE FRAISAGE PIÈCES

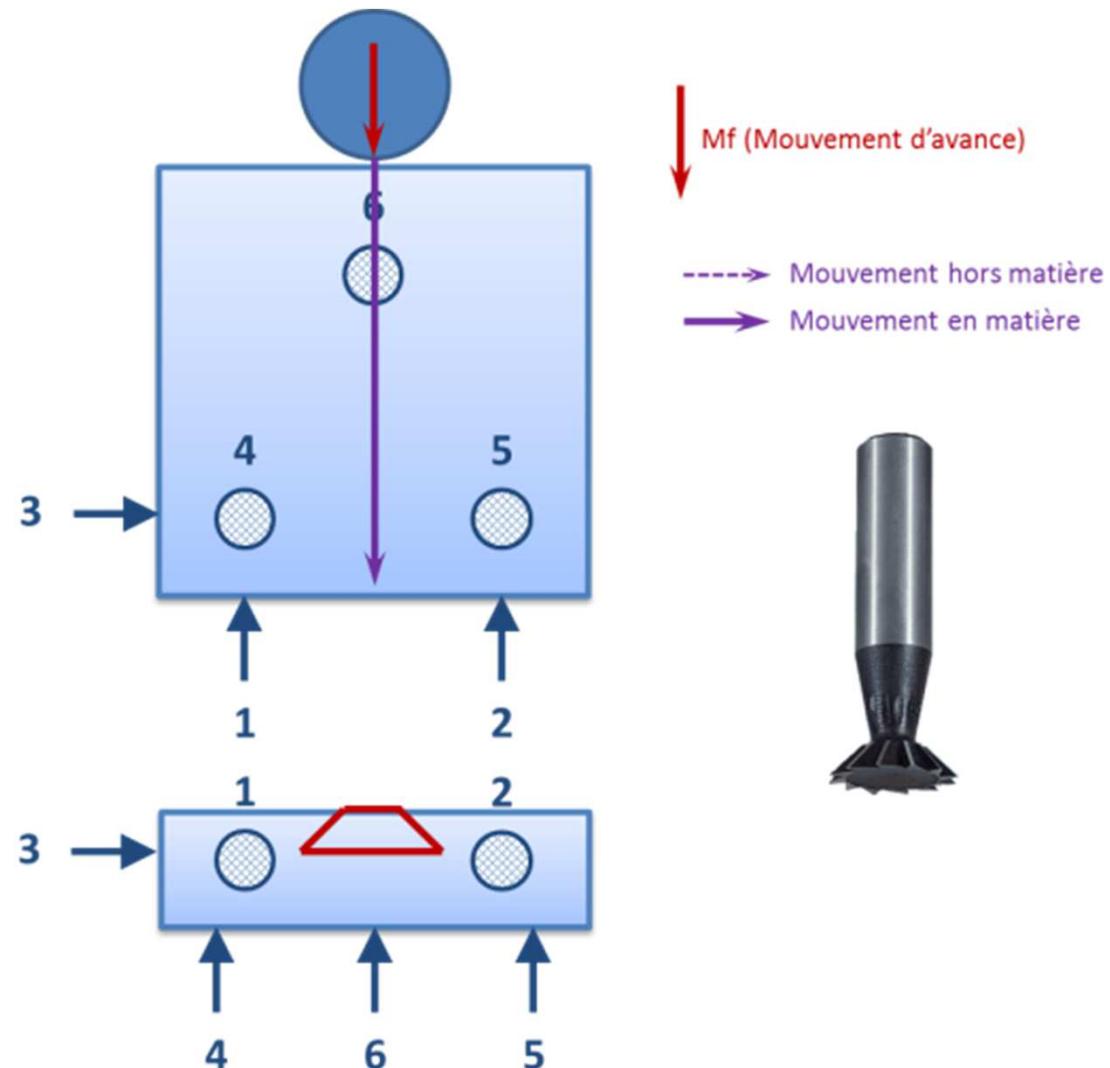


40

LE FRAISAGE PIÈCES

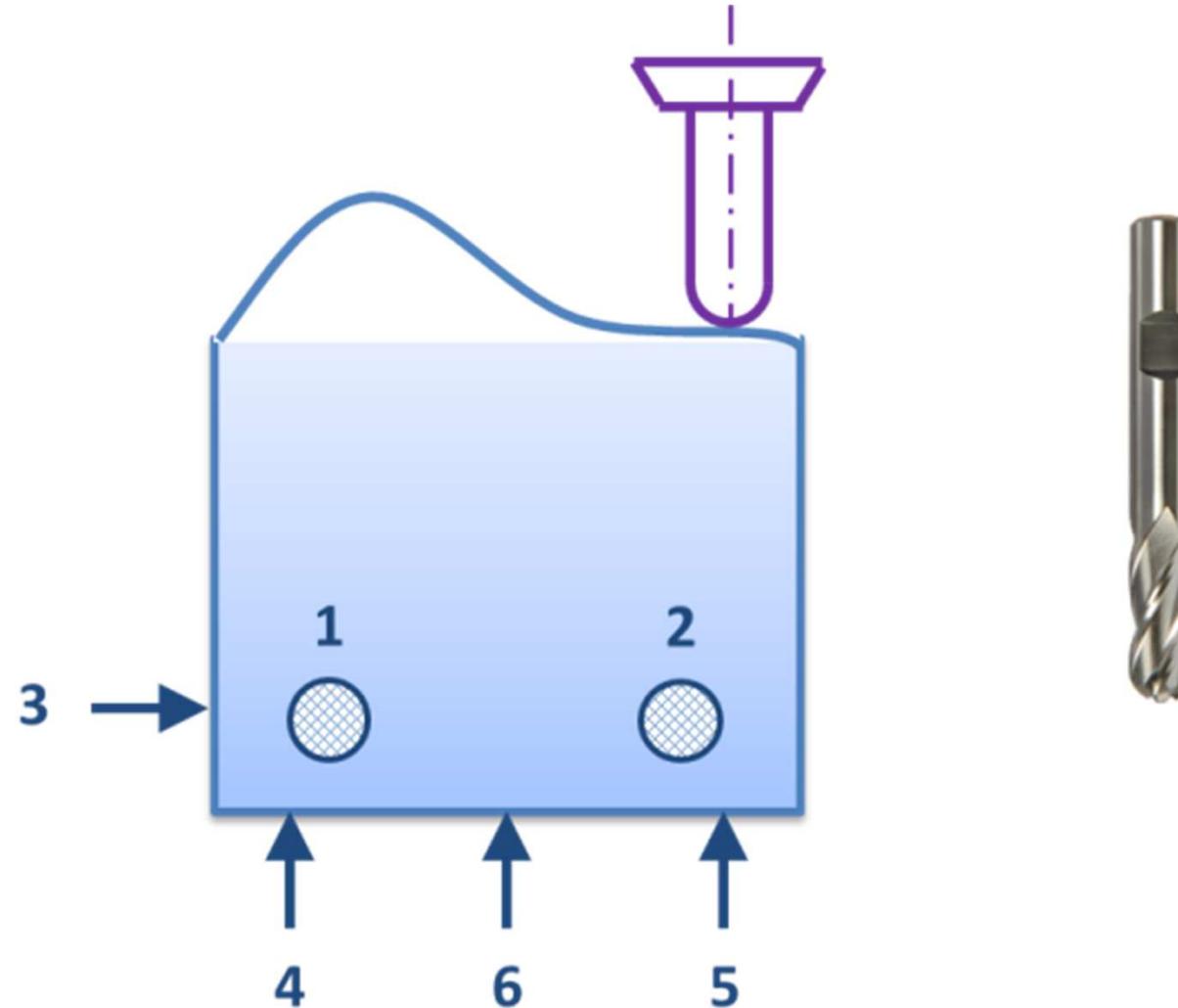


LE FRAISAGE PIÈCES



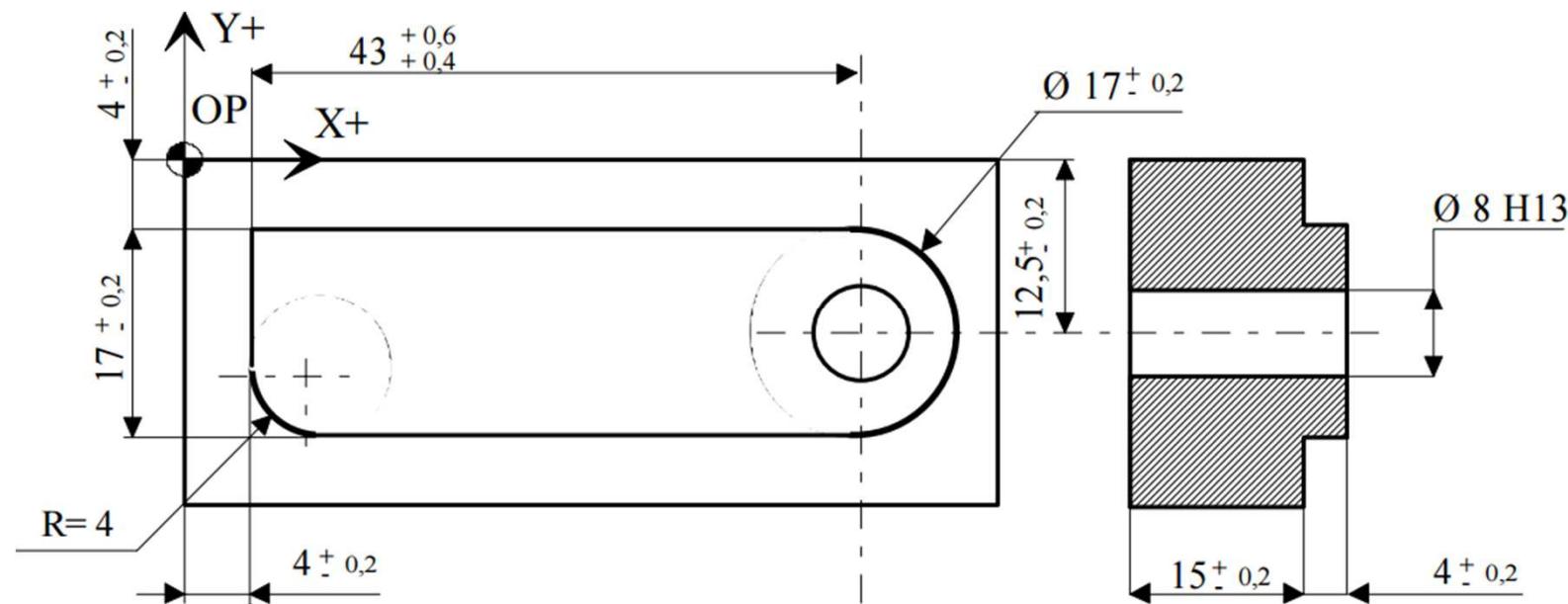
42

LE FRAISAGE PIÈCES



43

LE FRAISAGE CONTRAT DE PHASE



44

COUPE DES MÉTAUX

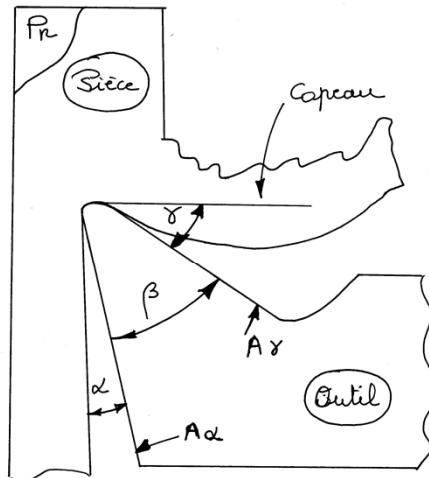
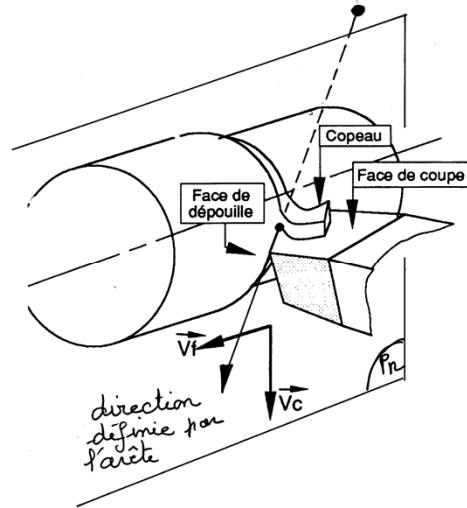
MATÉRIAUX DES OUTILS

- De bonnes conditions d'usinage sont garanties par un choix pertinent du matériau de l'outil en fonction du matériau à usiner. Les principaux matériaux d'outils sont :
 - les aciers trempés dits « rapides » qui sont des aciers fortement alliés dont le pourcentage en carbone dépasse les 0,7%. En fonction des matériaux à usiner on leur adjoint du tungstène (W), du molybdène (Mo) ou du vanadium (V) (pour la résistance à l'usure) du chrome (Cr) (pour sa capacité à être trempé), du cobalt (Co) (pour améliorer la dureté à chaud) ou du manganèse (Mn) (pour minimiser la déformation) ;
 - les carbures métalliques issus de la métallurgie des poudres. Ils sont composés de carbures de tungstène, titane, tantale ou niobium auxquels on adjoint un liant (souvent du cobalt) ;
 - les céramiques composées d'alumine et d'oxyde métallique ;
 - les diamants.

45

COUPE DES MÉTAUX

GÉOMÉTRIE DE LA ZONE DE COUPE

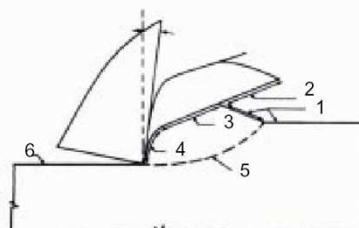
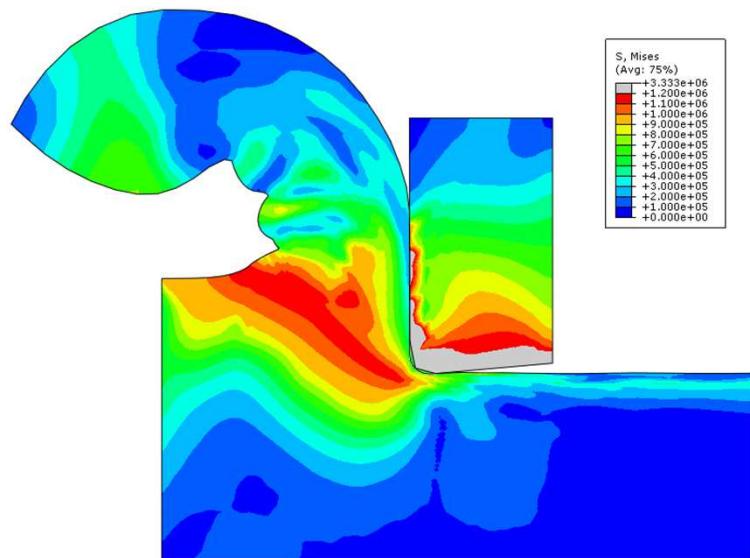
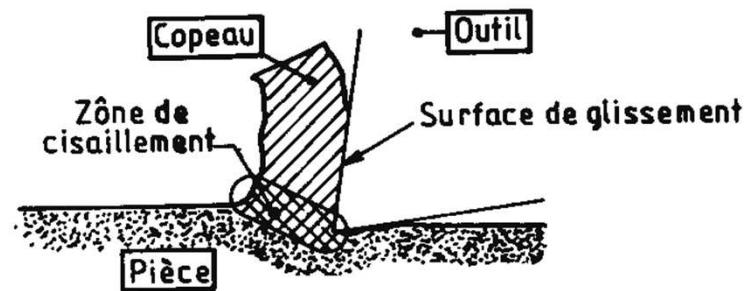
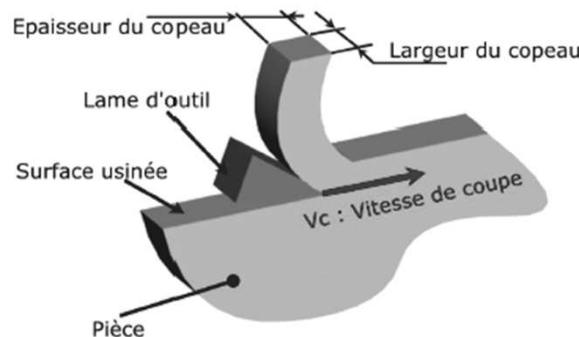


- P_n : plan normale à l'arête de coupe
- A_α : face de dépouille
- A_γ : face de coupe
- α_n : angle de dépouille
- β_n : angle de taillant
- γ_n : angle de coupe

46

COUPE DES MÉTAUX

PRINCIPE DE FORMATION DU COPEAU



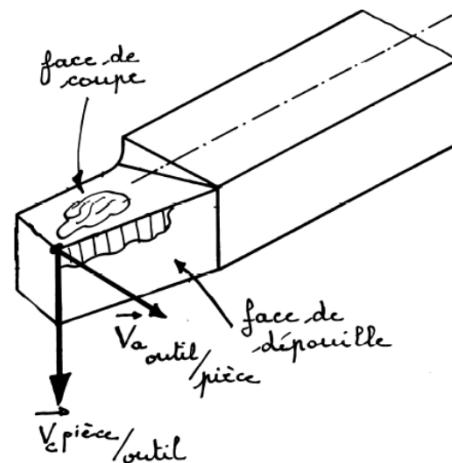
- 1 : surfaces non déformées,
- 2 : zone de la surface rompue par cisaillement catastrophique, séparée du segment suivant,
- 3 : bande de cisaillement intense due au cisaillement catastrophique pendant l'étape précédente,
- 4 : surface fortement cisaiillée.
- 5 : situation de la prochaine bande de cisaillement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

47

COUPE DES MÉTAUX

MÉCANISME D'USURE

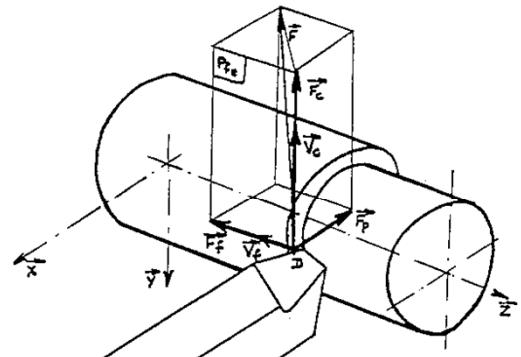
- Les principaux mécanismes d'usure des outils sont l'usure en cratère et l'usure en dépouille. Dans le cadre de l'usure en cratère, le copeau vient frotter sur la face de coupe créant au cours du temps un cratère qui va entraîner la casse de l'outil.
- L'usure en dépouille a lieu sur la face de dépouille. Le frottement du copeau sur cette surface va provoquer son affaissement puis sa ruine



48

COUPE DES MÉTAUX

PIUSSANCE DE COUPE



Méthode :

1. Dans le cadre du tournage faire un dessin avec écriture du torseur des efforts.
2. Exprimer la puissance à l'aide du comoment du torseur des efforts et du torseur cinématique.
3. Montrer que $F_p < F_f < F_c$.
 - F_p effort dû à la pénétration
 - F_f effort dû à l'avance
 - F_c effort dû à la coupe
4. Faire intervenir la notion de rendement :

$$\eta = \frac{\text{puissance consommée}}{\text{puissance utilisée}}$$

5. Définir la pression spécifique de coupe :

$$K_s = \frac{\text{Effortdecoupe}}{\text{Sectionduopeau}(A_S)}$$

49

COUPE DES MÉTAUX

PIUSSANCE DE COUPE

Torseur des actions mécaniques :

$$\{\mathcal{T}_{outil \rightarrow piece}\} = \begin{pmatrix} -F_p & 0 \\ -F_c & 0 \\ -F_f & 0 \end{pmatrix}_D$$

Torseur cinématique :

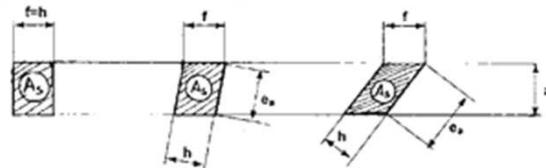
$$\{\mathcal{T}_{piece/outil}\} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & V_c \\ \omega & V_f \end{pmatrix}_D$$

La puissance de coupe :

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

De manière générale, les efforts d'avance et de pénétration sont négligeables par rapport à l'effort de coupe.

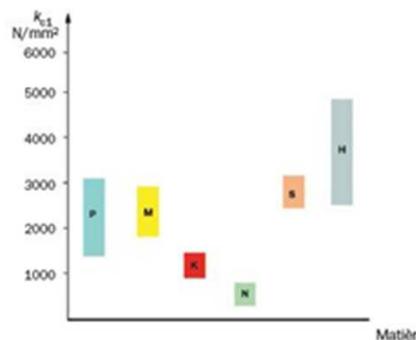
La figure suivante illustre des exemples de formes de copeaux suivant l'avance par dent et par tour ainsi que la profondeur de passe (a) :



1- Puissance de coupe en tournage

$$\mathcal{P} = \frac{f \cdot a \cdot K_c \cdot V_c}{60 \cdot 10^3}$$

La pression spécifique de coupe dépend du matériau à usiner :



- ISO P : aciers
- ISO M : aciers inoxydables
- ISO K : fontes
- ISO N : matières non ferreuses
- ISO S : superalliages réfractaires et titanes
- ISO H : aciers trempés

- \mathcal{P} : Puissance de coupe en W
- f avance par tour en mm/tr
- a : profondeur de passe en mm
- K_c : pression spécifique de coupe en N/mm²
- V_c : vitesse de coupe en m/min

COUPE DES MÉTAUX

PUISANCE DE COUPE

$$\mathcal{P} = \frac{f \cdot a \cdot Kc \cdot V_c}{60 \cdot 10^3}$$

- \mathcal{P} : Puissance de coupe en W
- f avance par tour en mm/tr
- a : profondeur de passe en mm
- Kc : pression spécifique de coupe en N/mm²
- V_c : vitesse de coupe en m/min

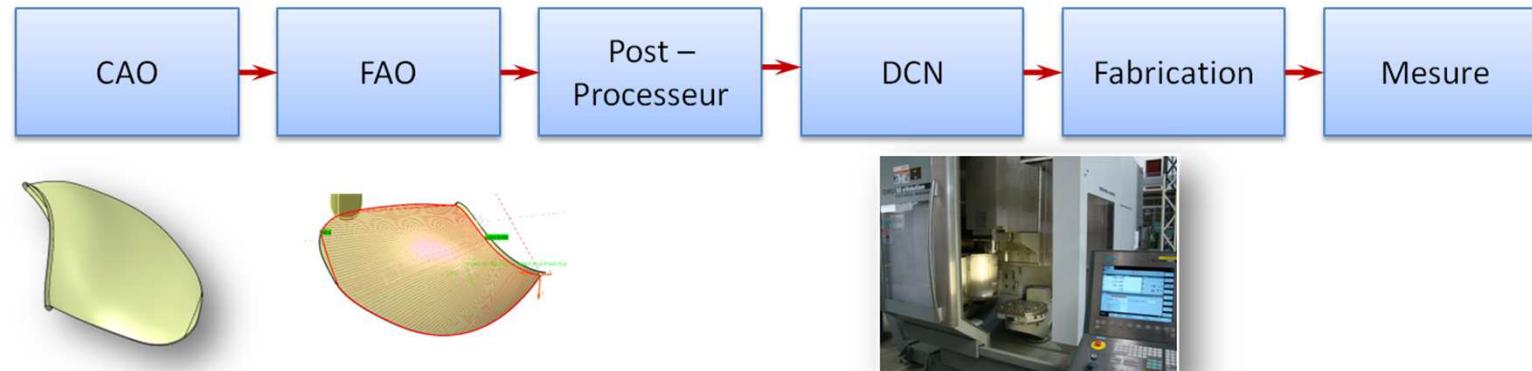
$$\mathcal{P} = \frac{a_a \cdot a_r \cdot fz \cdot Z \cdot Kc \cdot V_c}{60 \cdot 10^3}$$

- \mathcal{P} : Puissance de coupe en W
- a_a : profondeur de passe axiale en mm
- a_r : prise de passe radiale en mm
- fz : avance en mm par tour et par dent
- Z : nombre de dents
- Kc : pression spécifique de coupe en N/mm²
- V_c : vitesse de coupe en m/min

51

USINAGE CN

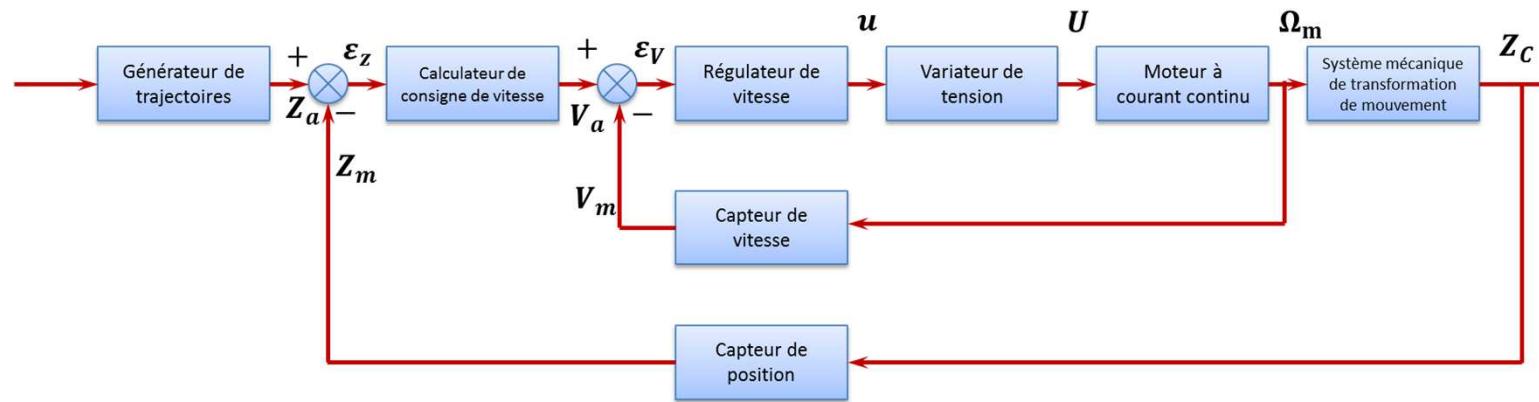
DE LA CONCEPTION À LA FABRICATION



52

USINAGE CN

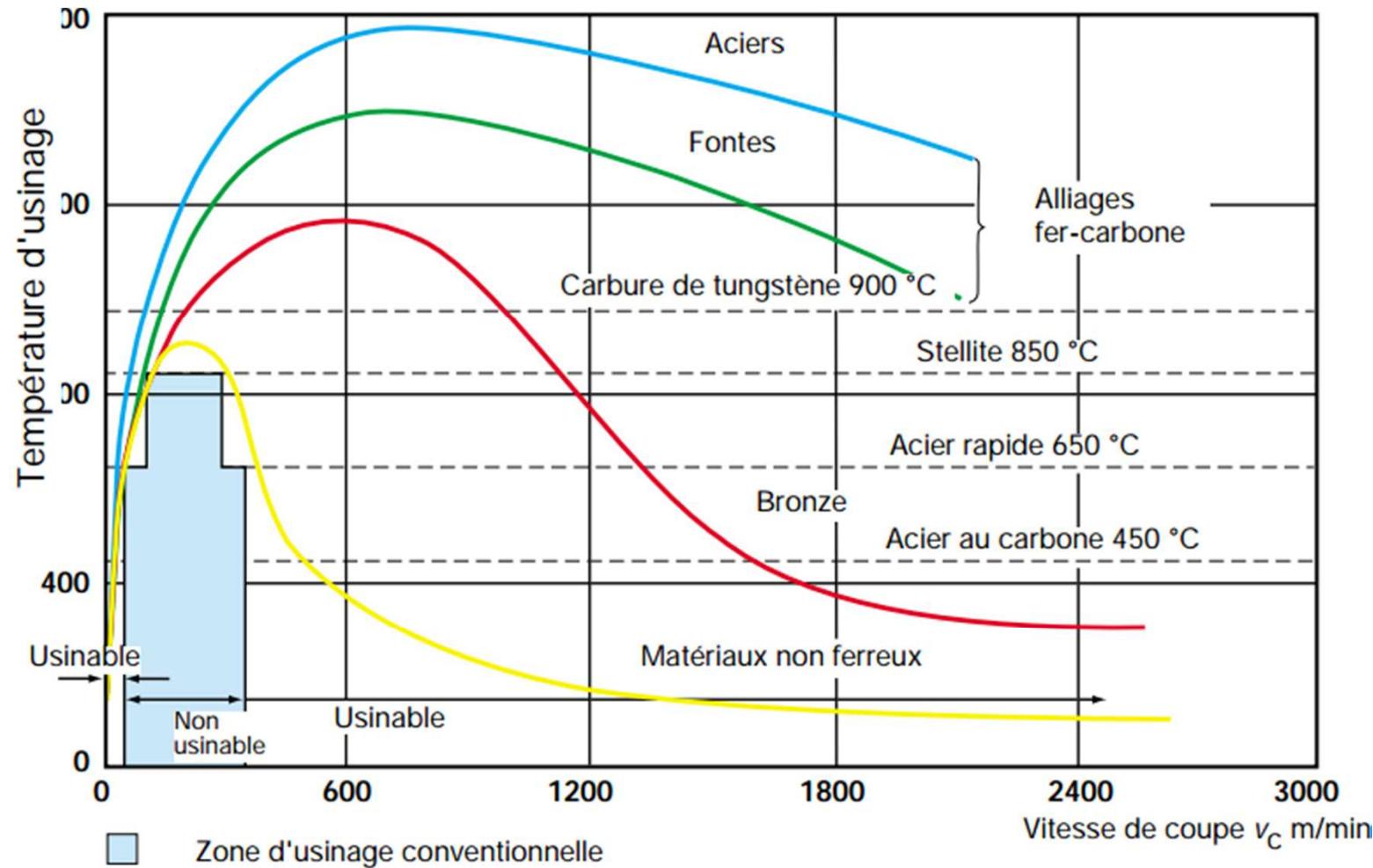
STRUCTURE D'UN AXE ASSERVI



53

USINAGE CN

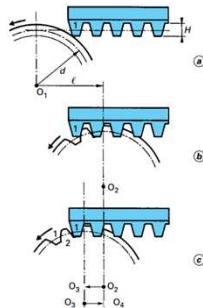
USINAGE GRANDE VITESSE



Température d'usinage fonction de la vitesse de coupe

LES AUTRES PROCÉDÉS DE FABRICATION

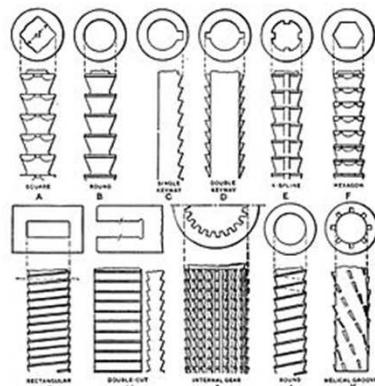
TAILLE DES ENGRENAGES



Taille à l'outil pignon ou crémaillère



Taille à la fraise mère



Exemples de brochage



Denture de finition



Denture de demi finition

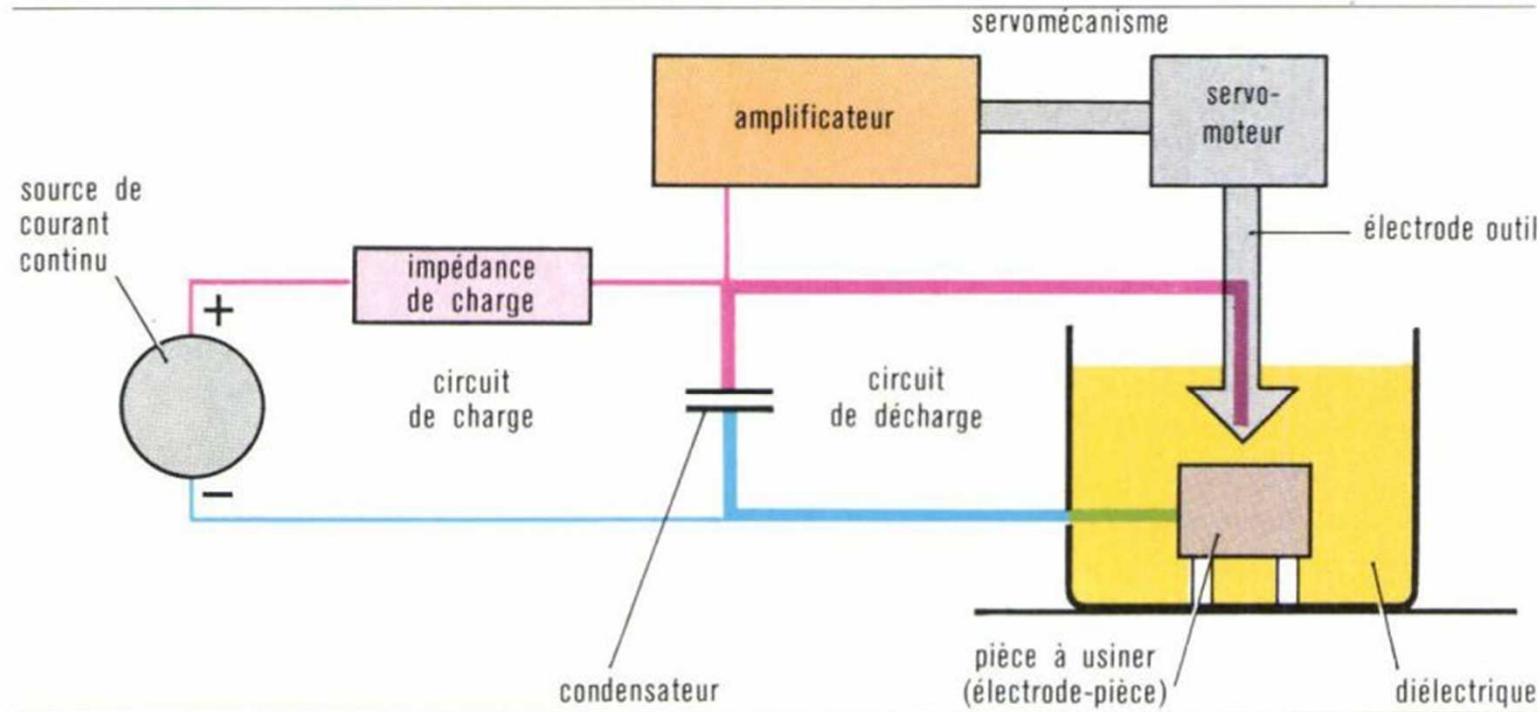


Denture d'ébauche

55

LES AUTRES PROCÉDÉS DE FABRICATION

ÉLECTRO ÉROSION



Principe de l'usinage par électro-érosion.

56

LES AUTRES PROCÉDÉS DE FABRICATION RECTIFICATION



57

LES AUTRES PROCÉDÉS DE FABRICATION POLISSAGE



58

FIN

59

○ PRÉSENTATION

- ◆ Tournage conventionnel
 - ◆ <http://www.youtube.com/watch?v=4w8EB2rBU0I>
- ◆ Tournage à commande numérique
 - ◆ <http://www.youtube.com/watch?v=iKizLfzz7GM>
- ◆ Tournage multi axes
 - ◆ <http://www.youtube.com/watch?v=idImPiYb6Zo>



- ◆ <http://www.youtube.com/watch?feature=fvwp&v=ZAn0eqRpLFO&NR=1>
- ◆ <http://www.youtube.com/watch?v=iKizLfzz7GM>
- ◆ <http://www.youtube.com/watch?v=ny04UDEnJ6Q>
- ◆ <http://www.youtube.com/watch?v=uUx3ihrKjYE>
- ◆ Pièces de grand diamètre
 - ◆ <http://www.youtube.com/watch?v=LbvRPLHq2So>
 - ◆ <http://www.youtube.com/watch?v=q7vw50-ApDc> (Centre vertical)



○ PRÉSENTATION

- ◆ Fraisage conventionnel
 - ◆ <http://www.youtube.com/watch?v=l-PPh8KFjMM>
- ◆ Fraisage à commande numérique
 - ◆ <http://www.youtube.com/watch?v=qe9kLhKxDRo>



62

- LES OUTILS
- USINAGE SUR LE FLANC - CONTOURNAGE

<http://www.youtube.com/watch?v=UGkVP3AqL3g>

- LES OUTILS
- USINAGE DE FORMES COMPLEXES

<http://www.youtube.com/watch?v=ENfisXbgJII>
<http://www.youtube.com/watch?v=QJ3zTzP-VQM&list=UUJnbvK04xut4Ri62dHtQ4vJQ&index=19>

○ VIDEOS

- ◆ <http://www.youtube.com/watch?v=YP3MZP2-gzU&list=UUnbvK04xut4Ri62dHIQ4vJQ>
- ◆ <http://www.youtube.com/watch?v=nzb-i7-fuq8&list=UUnbvK04xut4Ri62dHIQ4vJQ>
- ◆ <http://www.youtube.com/watch?v=Cs2A1jaaxRQ&list=UUnbvK04xut4Ri62dHIQ4vJQ>
- ◆ http://www.youtube.com/watch?v=FBMpyhk_hel&list=UUnbvK04xut4Ri62dHIQ4vJQ
- ◆ http://www.youtube.com/watch?v=UB3UZ6Y_ed4
- ◆ <http://www.youtube.com/watch?v=gzIcBrwVThQ>
- ◆ <http://www.youtube.com/watch?v=gzIcBrwVThQ>
- ◆ <http://www.youtube.com/watch?v=qe9kLhKxDRo>
- ◆ <http://www.youtube.com/watch?v=Fjzhgzafr0>
- ◆ <http://www.youtube.com/watch?v=NDzUiZsbQtw>



- LES MATÉRIAUX À OUTILS
- MATÉRIAUX

◆ Les aciers rapides

- ◆ Aciers fortement alliés
- ◆ Pourcentage de carbone supérieur à 0,7
- ◆ Aciers trempés
- ◆ Eléments d'addition

Elément d'addition	Effet
Carbone	↗ La dureté ↘ Ductilité
Tungstène	↗ résistance à l'usure
Molybdène	≈ Tungstène
Vanadium	↗ résistance à l'usure
Chrome	↗ trempabilité
Cobalt	↗ la dureté à chaud
Manganèse	Évite la déformation

- LES MATÉRIAUX À OUTILS
- MATÉRIAUX

- ◆ Les carbures

- ◆ Composants

- ◆ Substances dures (70 à 90%)
- ◆ Carbure de tungstène
- ◆ Carbure de titane
- ◆ Carbure de tantale
- ◆ Carbure niobium
- ◆ Substances liantes (10 à 30%)
- ◆ Cobalt
- ◆ Nickel ou fer



- ◆ Les céramiques

- ◆ Alumine (Al_2O_3) et oxyde métallique
- ◆ Matériau fragile mais d'une grande dureté

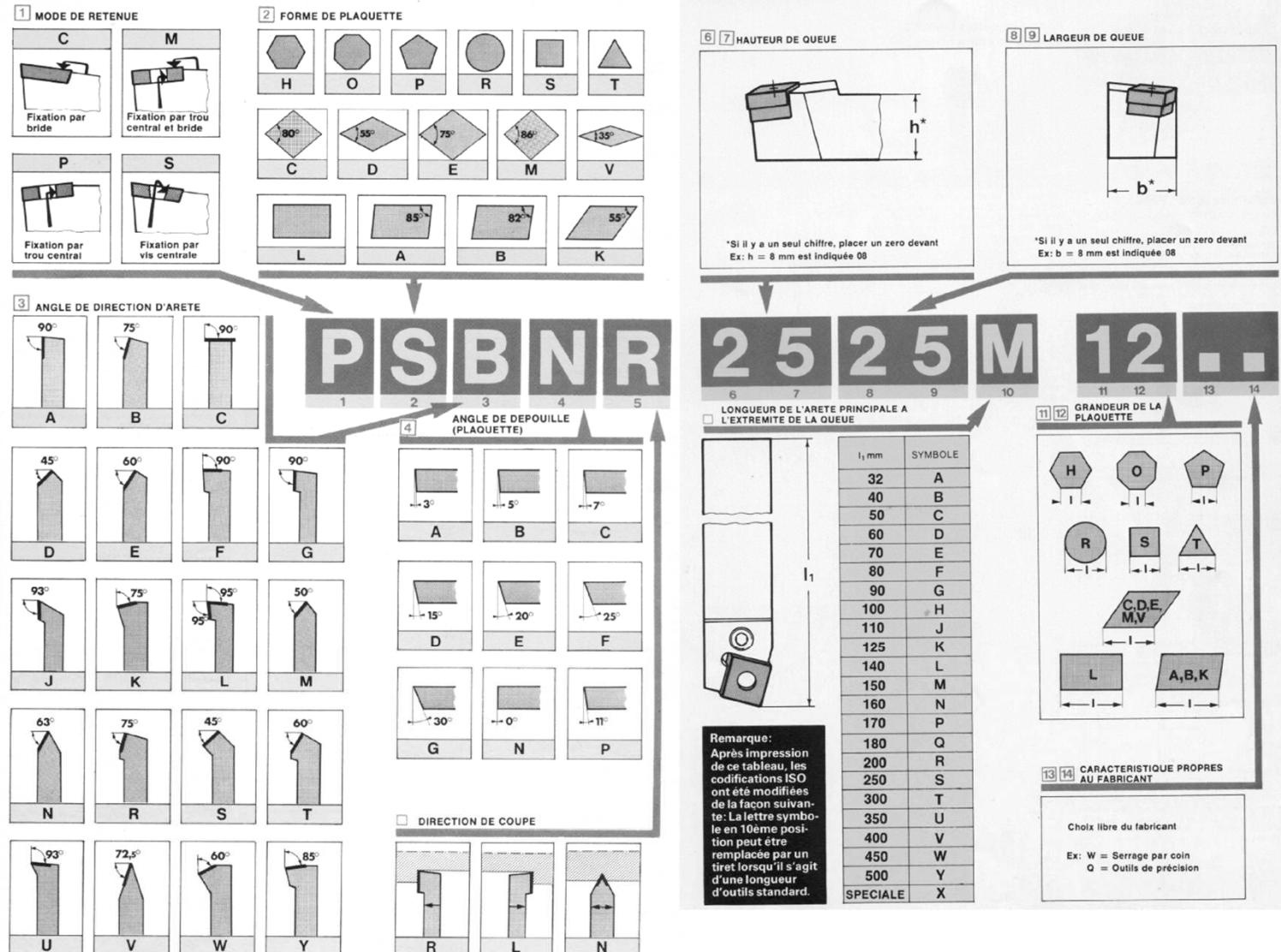
- ◆ Les diamants

- ◆ Revêtement :

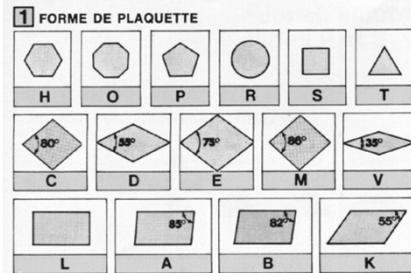
- ◆ Dépôt par CVD sur des carbures (carbure ou nitrure de titan)
- ◆ Augmente la résistance à l'usure



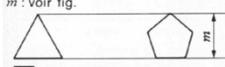
- LES MATERIAUX À OUTILS
- PORTE PLAQUETTES & PLAQUETTES



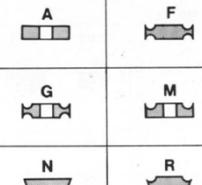
- LES MATERIAUX A OUTILS
- PORTE PLAQUETTES & PLAQUETTES

CODE ISO – Plaquettes amovibles


d : diamètre théorique du cercle inscrit à la plaquette
s : épaisseur de la plaquette
m : voir fig.



T P M R
1 2 3 4

4 TYPE DE PLAQUETTE

X
Exécution spéciale

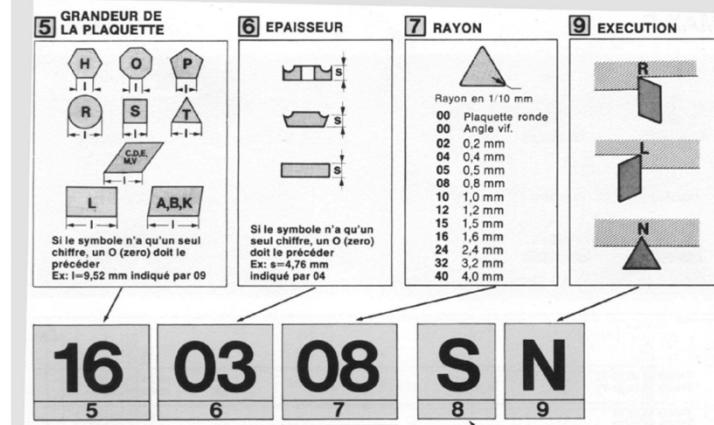
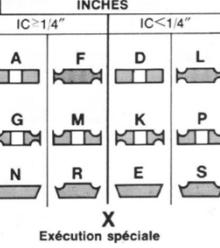
3 TOLERANCES

Lettre caract.	Tolérances en millimètres \pm			Tolérances en inches \pm		
	<i>m</i>	<i>s</i>	<i>d</i>	<i>m</i>	<i>s</i>	<i>d</i>
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	± 0.0010	± 0.001	± 0.0010
G	± 0.025	± 0.13	± 0.025	± 0.0010	± 0.005	± 0.0010
J	± 0.005	± 0.025	± 0.005	± 0.0002	± 0.001	± 0.0005
K	± 0.013	± 0.025	± 0.005	± 0.0005	± 0.001	± 0.0005
L	± 0.025	± 0.025	± 0.005	± 0.0010	± 0.001	± 0.0005
M	± 0.08	± 0.13	± 0.05	± 0.003	± 0.005	± 0.002
U	± 0.13	± 0.13	± 0.25	± 0.005	± 0.015	± 0.005

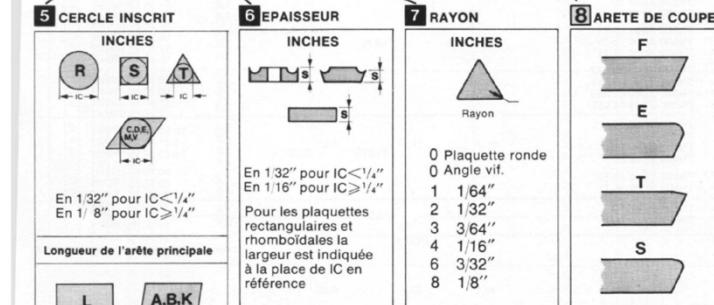
1) Ces tolérances s'appliquent normalement aux plaquettes amovibles ayant des arêtes secondaires rectifiées (biseau plan).

2) La tolérance dépend des dimensions de la plaquette 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 F	Tolérance sur <i>m</i> \pm		Tolérance sur <i>d</i> \pm	
	Classe M	Classe U	Classe M	Classe U
Diamètre du cercle inscrit mm	mm	in	mm	in
6,35	0,250	$\pm 0,08$	$\pm 0,003$	$\pm 0,13$
9,52	0,375	$\pm 0,08$	$\pm 0,003$	$\pm 0,13$
12,7	0,500	$\pm 0,13$	$\pm 0,005$	$\pm 0,20$
15,88	0,625	$\pm 0,15$	$\pm 0,006$	$\pm 0,27$
19,05	0,750	$\pm 0,15$	$\pm 0,006$	$\pm 0,27$
25,4	1,000	$\pm 0,18$	$\pm 0,007$	$\pm 0,38$



NOTA: le code ISO ne comprend que les 7 premiers symboles. 8 et 9 sont des symboles complémentaires. Le fabricant peut en plus ajouter encore des symboles pour par ex. identifier la forme du brise-coupe etc.



COMPARAISON — arêtes de coupe/cercle inscrit — en mm

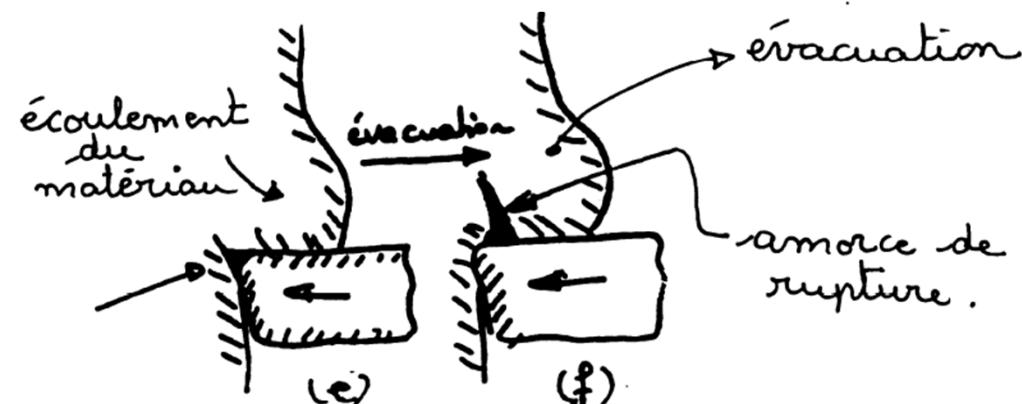
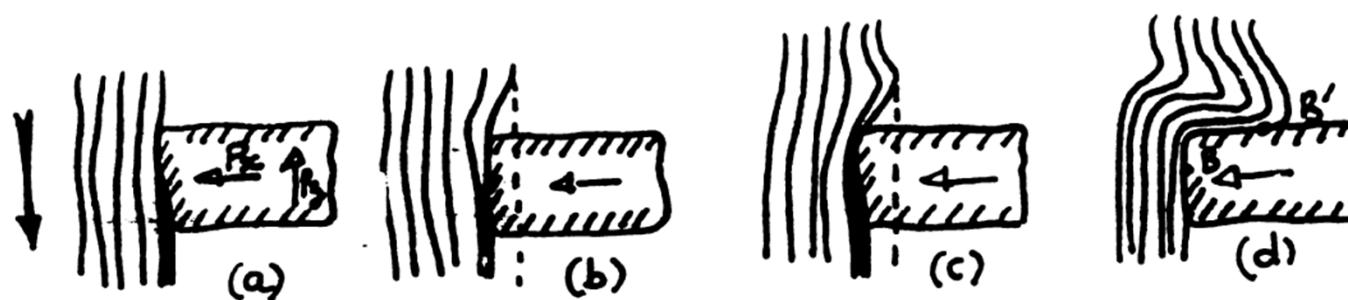
	06	09	11	16	22	27	33	44
					09	12	15	19
55°					07	11	15	23
80°					06	09	12	16
IC = d	5/32"	7/32"	1/4"	3/8"	1/2"	5/8"	3/4"	1"

Pour plaquettes rectangulaires et rhomboidales la longueur du tranchant est indiquée en 1/4"

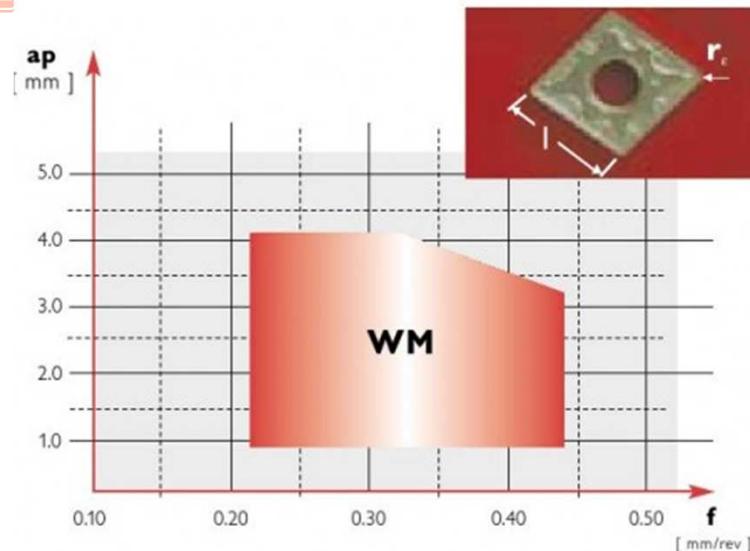
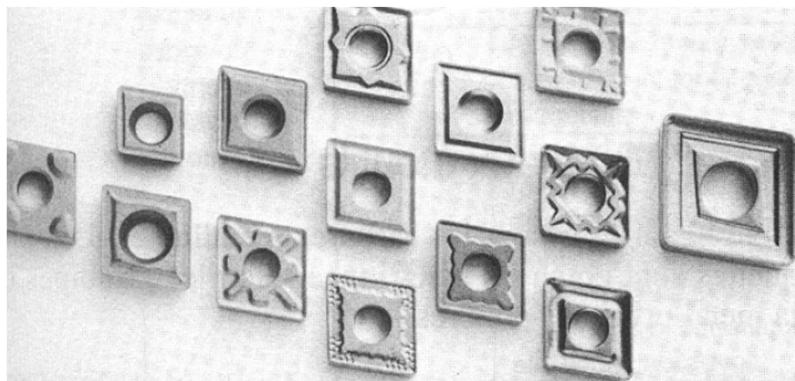


- L'USURE DES OUTILS
- MÉCANISMES D'USURE

- ◆ La géométrie de la pièce dépend directement de la géométrie (et de l'acuité) de l'arête de coupe.
- ◆ Diminuer la vitesse de coupe permet d'augmenter la durée de vie de l'outil ...
 - ◆ ... mais diminue la productivité

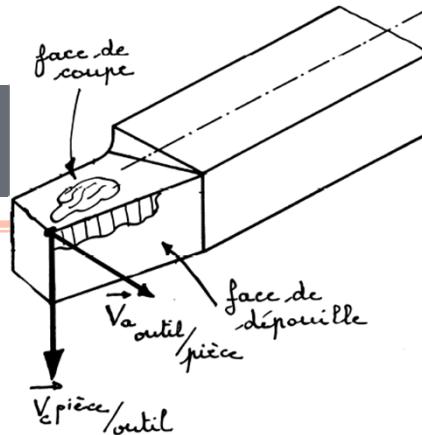


- L'USURE DES OUTILS
- NOTION DE BRISE COPEAU

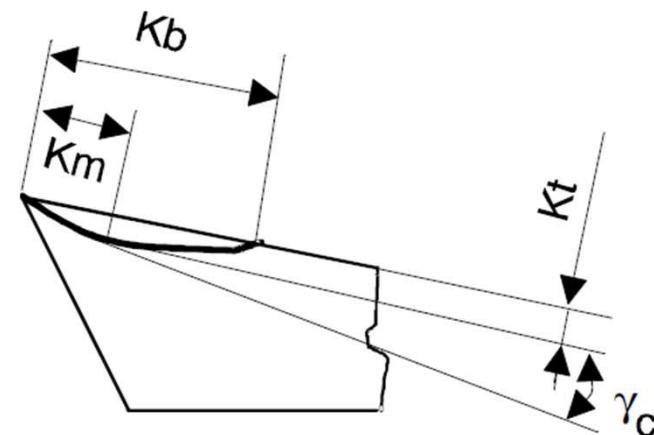


- ◆ La fragmentation du copeau permet
 - ◆ De ne pas altérer la surface
 - ◆ D'évacuer plus facilement la chaleur de la coupe
 - ◆ De réduire l'usure de l'outil

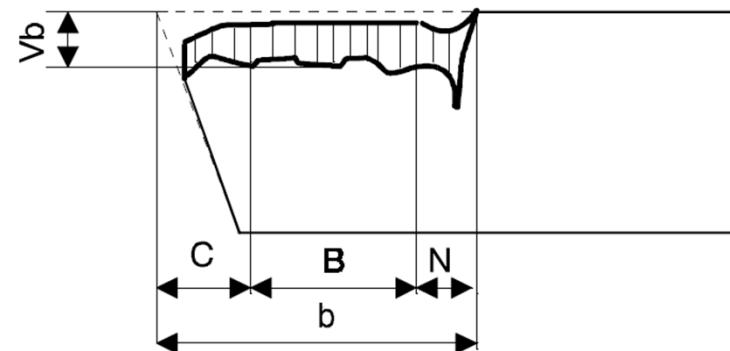
- L'USURE DES OUTILS
- LES MANIFESTATIONS DE L'USURE



- ◆ Usure en cratère K_t



- ◆ Usure en dépouille V_b



- ◆ Autres types d'usure

- ◆ Usure par fondrement d'arête
- ◆ Usure en entaille
- ◆ Usure par fissuration

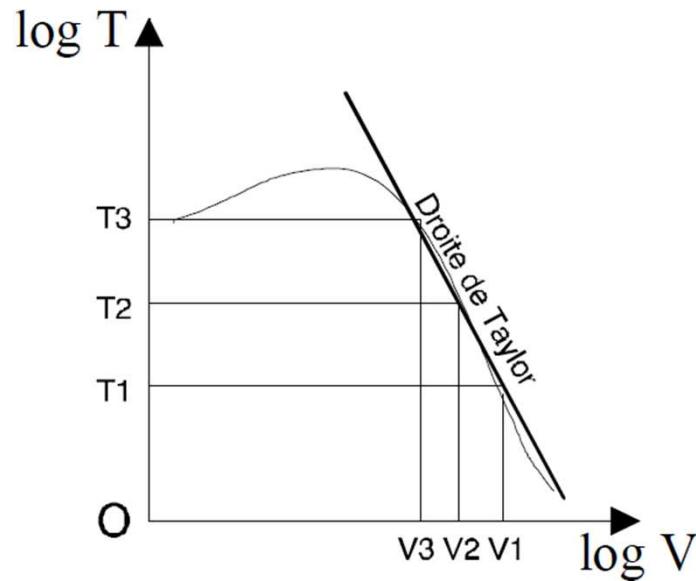
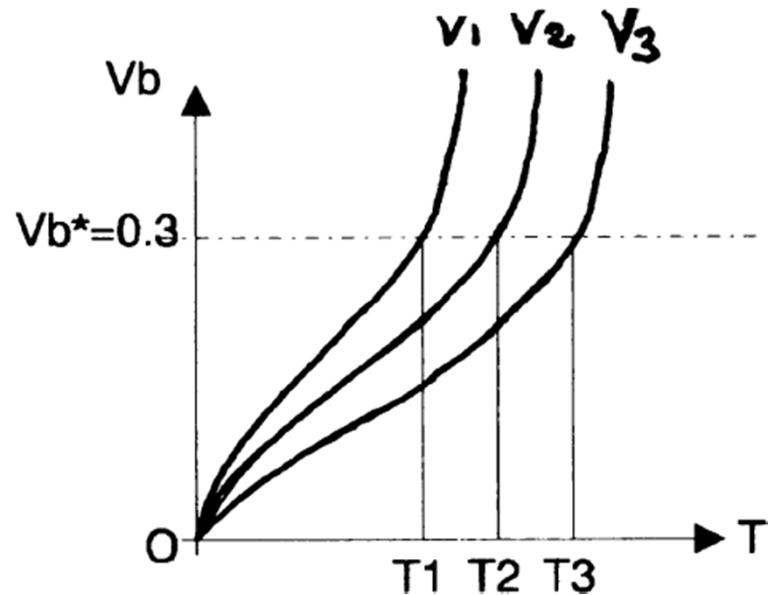


- L'USURE DES OUTILS
- LOIS D'USURE

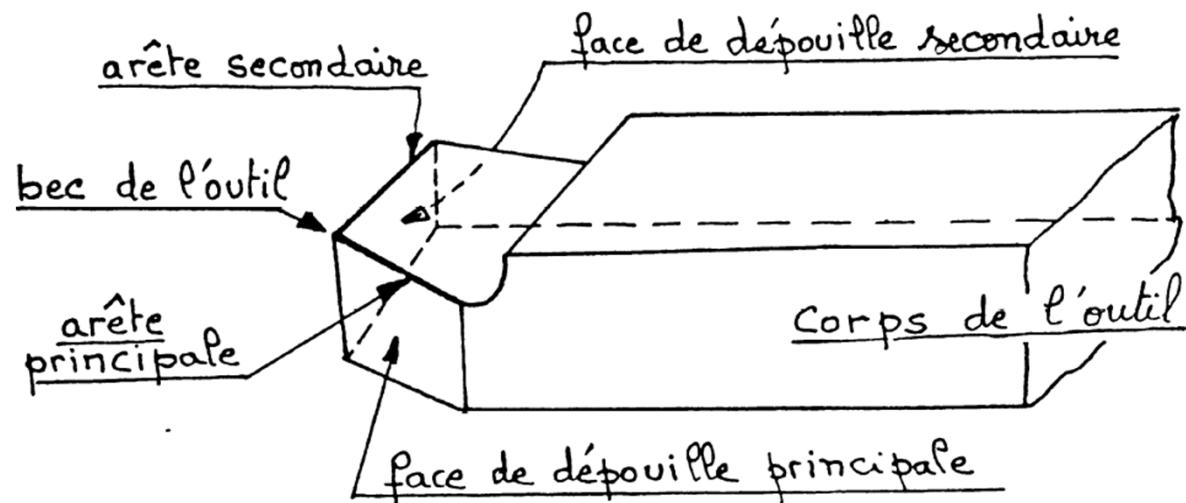
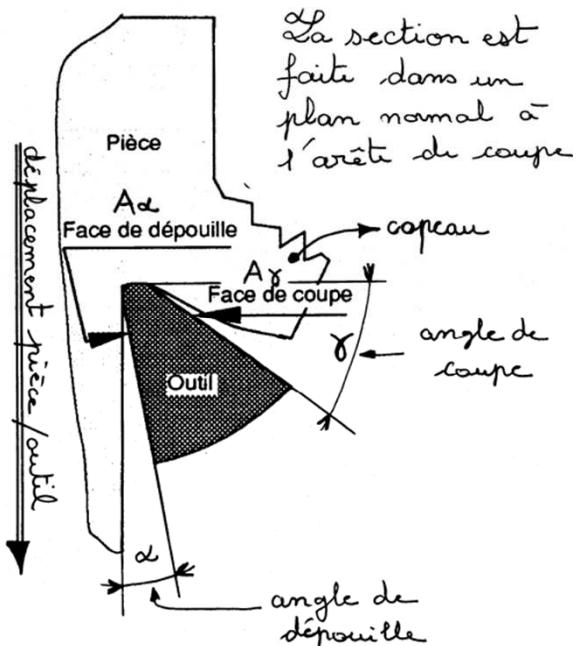
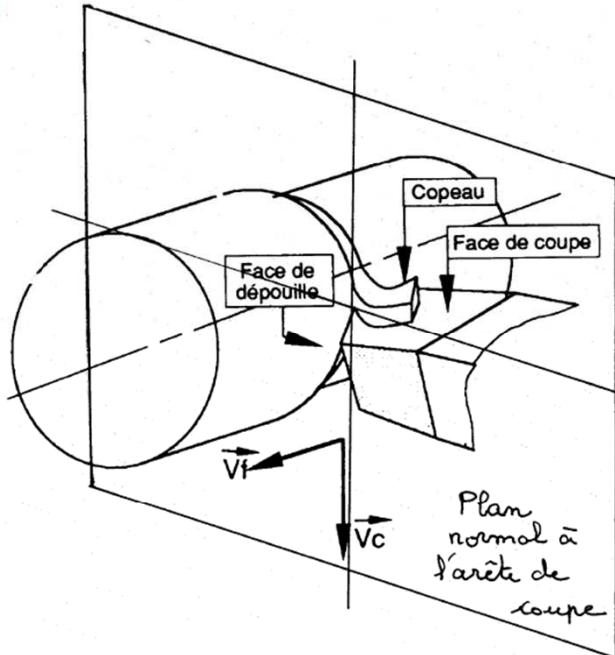
◆ Modèle de Taylor

- ◆ T temps en min
- ◆ V : Vitesse en m/min
- ◆ Cv, n : constantes

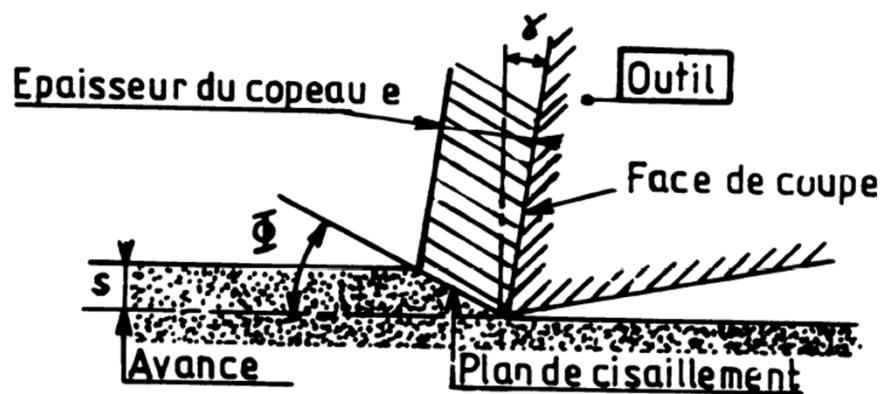
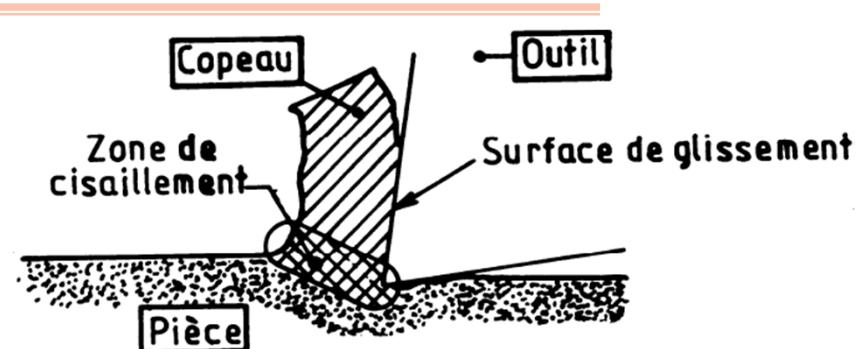
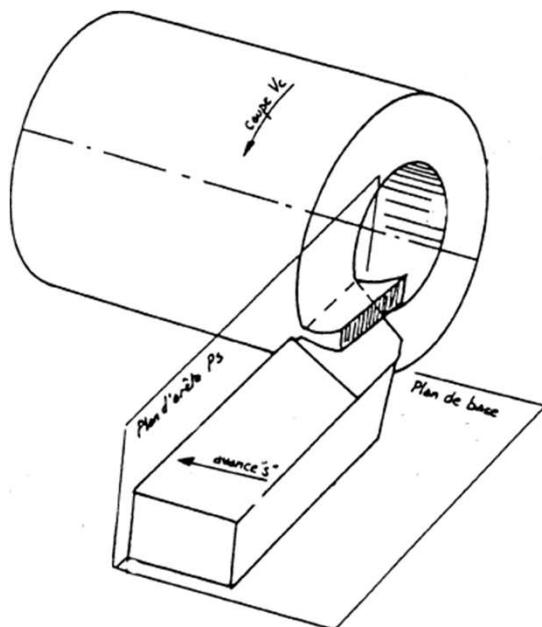
$$T = C_v V^n$$



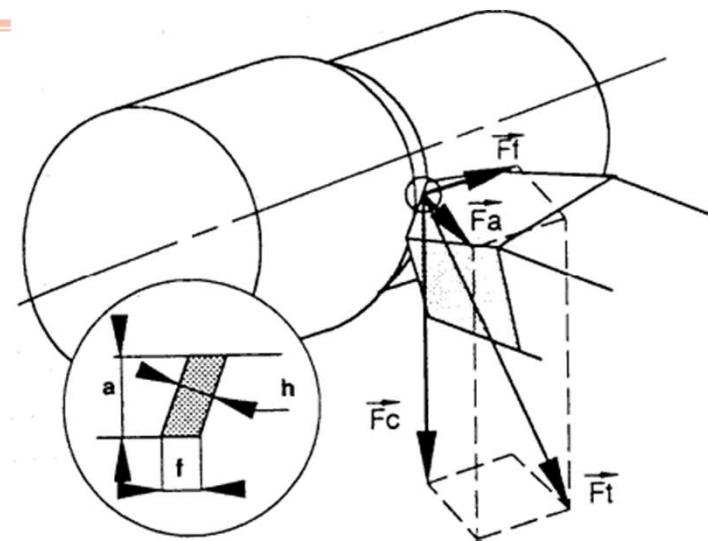
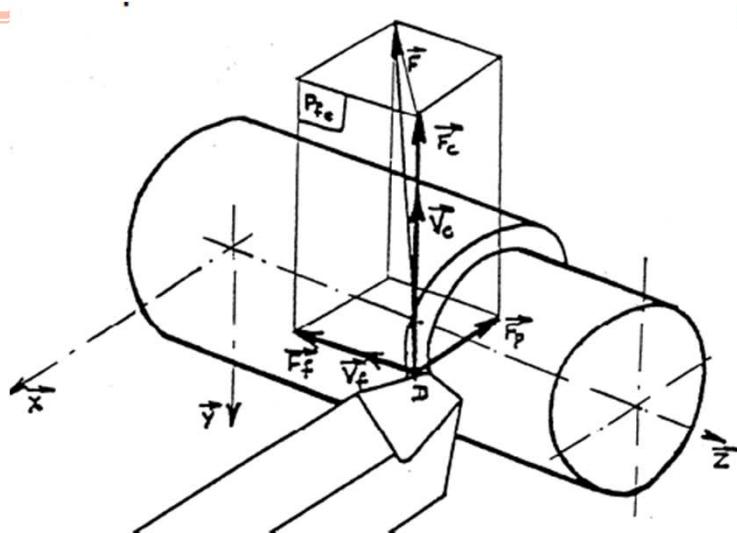
○ GÉOMÉTRIE DES OUTILS



- EFFORTS ET PUISSANCE DE COUPE
- THÉORIE DE MERCHANT



- EFFORTS ET PUISSANCE DE COUPE
- MODÈLE PRATIQUE



- ◆ F_p : force transversale
- ◆ F_c : force de coupe – direction définie par V_c
- ◆ F_f : force d'avance – direction définie par le vitesse d'avance